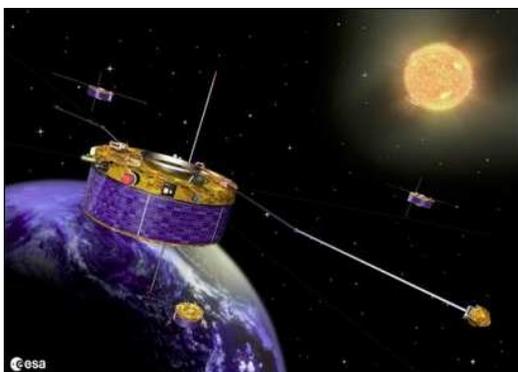
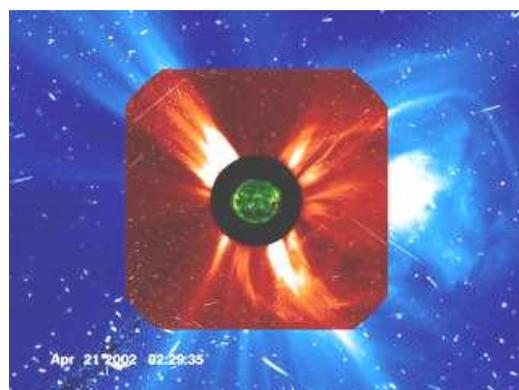


Institut National des Sciences de l'Univers
Centre National de la Recherche Scientifique

Programme National Soleil-Terre



Bilan 2002-2005 et perspectives

Novembre 2005

Dossier de renouvellement du PNST
préparé et rédigé par le Conseil Scientifique et le Directeur du PNST

Rapport d'Activité 2002-2005 et Prospective

Crédits photographiques et artistiques des illustrations en couverture:

NASA pour TRACE

ESA-NASA pour SOHO

ESA pour le dessin des satellites CLUSTER sur le fond Terre-Soleil

Tony Van Eyken pour la photographie des antennes EISCAT du Svalbard

Programme National Soleil-Terre

Bilan et Perspectives

Introduction	p7
Rapport d'activité	p13
I Formation et émergence des champs magnétiques solaire et stellaires	p15
A Polarisation atomique et moléculaire observée avec THEMIS et au Pic du Midi	p16
B Observations à haute résolution spatiale de l'émergence du champ magnétique	p18
C Gradient vertical du champ magnétique dans les tâches	p18
D Cyclicité magnétique	p19
E Champs magnétiques stellaires	p19
II Magnétisme solaire: instabilités, éruptions, éjections de masse, particules de haute énergies	
A Les éruptions solaires	p24
B Ejections de masse (CME)	p26
C Evénements à particules	p28
III Chauffage de la couronne et formation du vent solaire	
A Processus de chauffage de la couronne : la quête des petites échelles	p32
B Chauffage de la couronne : et si la thermodynamique était à revoir ?	p33
C Formation du vent solaire : le rôle des ondes d'Alfvén	p34
D Formation du vent solaire : l'apport des modèles cinétiques	p34
E Mesures coronographiques de la turbulence dans la couronne interne	p35
F Formation du vent solaire : l'écoulement dans les trous coronaux polaires	p35
G Flux de masse du vent solaire à trois dimensions	p36
IV Interaction du vent solaire avec la magnétosphère, l'ionosphère et la thermosphère terrestres	
A L'interaction du vent solaire avec les régions polaires de la magnétosphère et de l'ionosphère	p38
B Les arcs auroraux et autres phénomènes dynamiques nocturnes	p40
C Interaction avec l'atmosphère neutre	p41
D Effet des événements solaires sur l'environnement terrestre	p42
E Turbulence et physique de la mesure radar	p42
V Les processus fondamentaux dans les plasmas du système solaire	
A Importance de la turbulence dans les plasmas du système solaire	p47
B Turbulence et chauffage	p47
C Turbulence et dynamo	p47
D Turbulence et reconnexion	p48
E Effets de géométrie	p50
F Phénomènes de filamentation	p51
G Interactions ondes-particules et turbulence dans les chocs non-collisionnels	p53
VI Relations Soleil-Terre et Météorologie de l'Espace	p57
VII Bases de données	
A Le Centre de Données de la Physique des Plasmas	p61
B BASS 2000	p62
C Ateliers « Bases de données/Logiciels SOHO » organisés par MEDOC	p63
VIII Instrumentation sol cofinancée par le PNST ou du ressort du PNST	
A EISCAT/ESR (gestion du temps français d'observation)	p64
B Participation française à SuperDARN	p64
C Service d'observation solaire de l'Observatoire de Paris	p64
D Service d'observation de la couronne, Observatoire Midi Pyrénées	p65
E Radiohéliographe de Nançay	p65
F Lunette Jean Rösch, Observatoire Midi Pyrénées	p65

Rapport de prospective	<i>p67</i>
I Mesure des champs magnétiques dans l'atmosphère solaire	
A Les développements instrumentaux au sol	<i>p69</i>
B Les développements théoriques	<i>p70</i>
C La mesure des champs magnétiques dans la couronne	<i>p73</i>
II Magnétisme solaire et stellaire et structure interne	
A Héliosismologie, magnétisme solaire et structure interne	<i>p75</i>
B Magnétisme, convection et supergranulation solaire	<i>p76</i>
C Magnétisme et activité stellaires	<i>p76</i>
III Magnétisme solaire :	
instabilité, éruptions, éjections de masse, particules de hautes énergies	
A Introduction	<i>p78</i>
B Mécanismes de stockage d'énergie et d'hélicité	<i>p78</i>
C Particules énergétiques	<i>p80</i>
D Sites de libération d'énergie et d'ouverture du champ	<i>p81</i>
E L'instrumentation du futur	<i>p82</i>
IV Chauffage de la couronne et formation du vent solaire	
A Perspectives théoriques et de modélisation	<i>p83</i>
B Perspectives concernant les moyens observationnels	<i>p84</i>
V Interactions vent solaire-magnétosphère-ionosphère	
A Objectifs scientifiques	<i>p86</i>
B Moyens mis en œuvre	<i>p88</i>
C Activités théoriques et de simulation	<i>p89</i>
D Comparaison avec les plasmas des magnétosphères planétaires	<i>p90</i>
VI Processus ionosphériques et interactions avec l'atmosphère	
A Objectifs scientifiques	<i>p92</i>
B Moyens mis en œuvre	<i>p94</i>
VII Relations Soleil-Terre et Météorologie de l'Espace	<i>p96</i>
VIII Bases de données	
A Centre de Données de la Physique des Plasmas (CDPP)	<i>p99</i>
B BASS 2000	<i>p100</i>
C MEDOC	<i>p101</i>
IX Instrumentation sol	
A THEMIS	<i>p102</i>
B ATST	<i>p102</i>
C Lunette Jean Rösch	<i>p102</i>
D Coronographie	<i>p103</i>
E Radiohéliographe de Nançay	<i>p103</i>
F Frequency Agile Solar Radio telescope (FASR)	<i>p103</i>
G LOIS/LOFAR	<i>p103</i>
H SuperDARN	<i>p104</i>
I EISCAT	<i>p104</i>
Rapport administratif du PNST pour le mandat 2002-2005	<i>p105</i>
I Conseil scientifique et direction du PNST	<i>p107</i>
II Budget	<i>p108</i>
III Ressources humaines	<i>p113</i>
IV Analyse des publications de la communauté du PNST	<i>p114</i>
V Interfaces avec les autres programmes nationaux	<i>p116</i>
Annexes	<i>p119</i>
I Thèses et Habilitations sur thématiques PNST 2002-2005	<i>p121</i>
II Publications examinées par des comités de lecture	<i>p127</i>
III Liste des Revues Invitées et Communications Publiées	<i>p167</i>

Introduction

Le programme national Soleil-Terre est né en 1998 de la fusion des groupements de recherche « Magnétisme solaire et stellaire » et « Plasmae » pour stimuler les échanges de ces deux communautés qui travaillaient aux deux extrémités de la chaîne des relations Soleil-Terre et pour créer une dynamique nouvelle en élargissant le champ d'activité de chacune d'elles. Le rapprochement de deux communautés anciennes, ayant des cultures et des traditions assez différentes, n'allait pas de soi et il n'a été rendu possible que par la volonté partagée d'aller voir au delà de son domaine habituel tout en y acceptant les « visiteurs ». Même si on perçoit de temps à autres une certaine nostalgie de l'époque où on était « entre plasmiciens » ou bien « entre physiciens solaires » la création du PNST paraît déjà bénéfique au terme de ce deuxième mandat comme le montre ce document, préparé par un groupe de travail du Conseil Scientifique et par la direction du programme, et présenté à la Commission Spécialisée d'Astronomie et d'Astrophysique pour demander la reconduction du programme.

Les thèmes scientifiques qui ressortissent au PNST sont déterminés par sa mission, qu'il est possible d'énoncer très brièvement : comprendre comment le Soleil et les variations de son activité contrôlent l'environnement terrestre. Le rayonnement électromagnétique et les particules de haute énergie produits par le Soleil sont les agents rapides de ce contrôle, alors que le plasma et le champ magnétique du vent solaire ainsi que leurs perturbations en sont des agents plus lents : les premiers parviennent à la Terre après quelques minutes ou quelques heures de transit, les seconds après quelques jours. La caractérisation de l'activité solaire et de ses variations sur des échelles de temps allant de la seconde à quelques dizaines d'années, la compréhension des perturbations dynamiques des enveloppes externes du Soleil, de leurs récurrences, de leur propagation jusqu'à la Terre et de leurs interactions avec le champ magnétique et l'atmosphère terrestres, la compréhension enfin de la dynamique de la magnétosphère et de l'atmosphère terrestres au sens large sont les principales tâches qui structurent cette recherche. Ce programme vaste et complexe doit être délimité en renonçant d'une part à l'étude du cœur du Soleil et d'autre part à celle de l'atmosphère terrestre en dessous de 50 à 100km d'altitude. Ces frontières semblent à peu près pertinentes jusqu'à présent mais à l'avenir elles pourraient être remises en cause par l'évolution de nos connaissances.

Le cadre général qui vient d'être présenté permet de définir les grands thèmes scientifiques qui organisent l'activité du PNST et le rapport d'activité ci-après. Le champ magnétique solaire joue un rôle déterminant dans la structuration et l'évolution des couches externes du Soleil et du vent solaire, il importe donc d'en comprendre la formation et l'émergence en plaçant cette étude dans une perspective stellaire plus générale. L'activité magnétique solaire qui se manifeste par des instabilités des structures magnétiques, des éruptions, des éjections de masse et par la production de particules de haute énergie, est le deuxième grand thème du PNST. L'étude du chauffage de la couronne et celle de la formation du vent solaire sont indispensables à la compréhension de la propagation jusqu'à la Terre, et d'une manière plus générale à la compréhension de l'héliosphère qui doit elle aussi être considérée dans une perspective astrophysique. Le quatrième thème du programme est l'interaction du vent solaire avec le système complexe formé par la magnétosphère et la haute atmosphère terrestre avec ses composantes neutre et ionisée. La

distinction de ces quatre thèmes ne doit pas occulter que des processus fondamentaux comparables sont à l'œuvre ici et là à des échelles qui peuvent être comparables ou très différentes : les études synoptiques et les travaux sur les méthodes théoriques générales sont essentiels pour avancer sur un large éventail de questions concernant la turbulence dans les plasmas, la reconnexion magnétique, le chauffage des plasmas et la production de particules de haute énergie, les phénomènes essentiellement non linéaires comme la filamentation ou les ondes de choc. L'étude de ces processus fondamentaux constitue le cinquième thème du PNST. Le sixième et dernier thème est celui de l'étude coordonnées des relations Soleil-Terre et de la météorologie de l'espace, dénomination un peu malheureuse, mais largement acceptée, d'un domaine qu'il faut bien distinguer de celui de la météorologie spatiale qui est l'étude de la météorologie de l'atmosphère terrestre au moyen d'observatoires spatiaux. Il y a cependant un parallèle à faire entre ces deux domaines : l'un et l'autre ont une base scientifique et un but opérationnel, la prévision, utile, voire indispensable, à certaines activités humaines. Les aspects opérationnels ne sont clairement pas du ressort du PNST qui a cependant pour vocation de contribuer à établir les bases scientifiques de ce nouvel art. La météorologie de l'espace, apparue il y a moins de vingt ans, est une discipline scientifique à part entière dont l'approche et les méthodes sont sans aucun doute plus heuristiques que celles d'autres disciplines comme la physique solaire ou magnétosphérique. Les thèmes couverts par le PNST sont présentés de manière détaillée sur le site web du programme <http://www.ias.u-psud.fr/pnst/> sous la rubrique « Présentation : objectifs et couverture ».

Le rapport d'activité présente les principaux résultats acquis par notre communauté pendant la période 2002-2005 et dresse un état des lieux des grands thèmes scientifiques du PNST. En extraire quelques faits marquants est forcément injuste et réducteur, essayons pourtant. Le télescope solaire franco-italien THEMIS fournit maintenant, grâce à ses capacités en spectropolarimétrie, des résultats de tout premier plan (second spectre solaire, champ magnétique des protubérances, gradient vertical du champ magnétique dans les taches). En ce domaine THEMIS restera sans concurrent véritable dans les cinq prochaines années. La lunette Jean Rösch (LJR) au Pic du Midi est un instrument complémentaire de THEMIS car elle permet de faire, avec une bonne résolution spatiale, des études spectropolarimétriques dans le bleu où se trouvent les raies de diffusion les plus polarisées du second spectre. Enfin le spectropolarimètre stellaire ESPaDOnS mis en service au début de l'année 2005 donne déjà des résultats très prometteurs notamment avec la mise en évidence de la topologie magnétique complexe de certaines étoiles de type solaire. Dans le domaine de l'imagerie gamma du Soleil, les observations faites avec RHESSI ont démontré que les sites d'accélération des électrons et des ions peuvent être différents contrairement à toutes les attentes. L'imagerie multi longueurs d'onde, de la radio aux rayons X, combinée à la modélisation des structures magnétiques coronales par extrapolation MHD des champs photosphériques mesurés, a permis d'étudier les configurations magnétiques éruptives et les mécanismes à l'origine de la déstabilisation des structures de grande échelle liée au déclenchement des éjections de masse coronale. L'imagerie radio (RH Nançay) combinée à la coronographie (SOHO/LASCO) a permis d'étudier en détail la formation rapide dans la basse couronne de certaines éjection de masse coronale. Les observations de SOHO/UVCS ont par ailleurs permis d'étudier la vitesse d'écoulement du plasma dans les régions « plumes » et « inter-plumes » des trous coronaux polaires. En physique magnétosphérique enfin il n'est pas exagéré de dire que CLUSTER a ouvert une nouvelle ère en montrant en particulier l'importance capitale des petites échelles dans la physique des grandes structures de l'environnement terrestre ; onde de choc, magnétopause, cornets polaires ou encore queue géomagnétique. L'orbite polaire de

CLUSTER permet en particulier une étude détaillée des cornets polaires, qui étaient relativement mal connus, et donne de la pénétration du plasma solaire dans la magnétosphère un point de vue très différent de celui qui prévalait jusqu'alors, fondé sur des observations généralement équatoriales. Les cartes de la convection magnétosphérique fournies par le réseau international de radars auroraux SuperDARN, combinées avec les sondages des radars EISCAT, les observations *in situ* de CLUSTER et la modélisation ont permis de nombreuses études détaillées de la réponse du système magnétosphérique aux variations du vent solaire. Par ailleurs les observations multipoints de CLUSTER ont éclairé d'un jour nouveau la physique du choc terrestre et celle de la turbulence dans la magnétogaine en permettant pour la première fois, grâce à des méthodes d'analyse développées dans notre communauté, de remonter au spectre spatial de la turbulence sans faire l'hypothèse de Taylor. Notons enfin de belles avancées théoriques dans l'étude de la filamentation ou de la turbulence MHD-Hall dans les plasmas. En ce qui concerne l'étude des relations Soleil-Terre, on peut noter les résultats sur la comparaison du contenu électronique total dans l'ionosphère (TEC) déduit des radars ionosphériques (systèmes EISCAT et ionosondes) et du GPS, contenu important pour les télécommunications et dont les variations spatiales et temporelles peuvent révéler des phénomènes sismiques. Notons également l'étude de la reconstruction du flux EUV du Soleil à partir de la surveillance de quelques raies de ce spectre ; ce flux détermine l'ionisation de la haute atmosphère terrestre et sa grande variabilité pourrait avoir une influence cruciale sur l'atmosphère et sur le climat.

Le rapport de prospective présente les grands axes vers lesquels l'activité du PNST va être orientée pendant les quatre prochaines années. La mesure du champ magnétique dans l'atmosphère solaire continuera d'être un des thèmes fédérateurs de notre communauté à la fois grâce à la poursuite de travaux théoriques sur la formation de la polarisation des raies hors ETL, du transfert du rayonnement polarisé dans des milieux 2D et 3D, voire turbulents, et de la modélisation MHD des structures magnétiques, modélisation qui deviendra particulièrement importante avec l'arrivée de nouvelles données de magnétographes vectoriels, notamment celles du satellite japonais SolarB. D'un point de vue instrumental, l'exploitation des données de THEMIS sera poursuivie en mettant en particulier l'accent sur le principal atout de THEMIS : la mesure simultanée de la polarisation dans plusieurs raies. Le savoir faire acquis dans ce domaine et dans le domaine de l'instrumentation polarimétrique sera également un atout pour l'établissement de collaborations dans le cadre du développement des instruments du futur tels que l'ATST. Forte de son savoir faire, la communauté française devrait participer à ce projet américain de télescope solaire de 4m, de préférence dans le cadre d'un effort européen concerté. Au-delà de la mesure du champ magnétique photosphérique, de nouveaux défis s'ouvrent avec la mesure du champ magnétique coronal. Dans les quatre années à venir, la communauté PNST pourra contribuer à des avancées significatives en ce domaine si les possibilités de nouvelles mesures coronographiques de l'effet Zeeman dans le proche IR se concrétisent (l'étude du site du Dôme C avec un Sky Brightness Monitor proposée à l'INSU se situe dans la perspective d'un projet international de coronographie), aux possibilités de mesures dans le domaine radioélectrique avec FASR et à plus long terme en développant des stratégies pour des missions spatiales futures avec lesquelles on pourrait mesurer le champ magnétique de la zone de transition et de la couronne par polarimétrie UV.

Les processus intervenant sous la tachocline, couche de transition entre les zones convective et radiative apparaissent de plus en plus comme jouant un rôle essentiel dans la production du champ magnétique solaire. Les thématiques du PNST pourraient être élargies dans les quatre prochaines années à des études d'héliosismologie locale, par exemple grâce à l'exploitation des

données du Solar Dynamics Observatory (SDO) qui permettront d'approfondir les résultats déjà obtenus sur la production (dynamo locale) des champs magnétiques au dessous des régions actives. La combinaison d'imagerie à grande échelle des cellules convectives du soleil « calme » au moyen de CALAS à la LJR du Pic du Midi et de la magnétographie grand champ avec SDO devrait par ailleurs permettre de comprendre l'émergence du champ magnétique « calme ». L'effort de comparaison des magnétismes stellaires et solaire sera poursuivi grâce à l'exploitation des données du spectro-polarimètre stellaire ESPaDOnS et à la mise en service du spectropolarimètre NARVAL au TBL.

L'étude de l'activité magnétique du Soleil et de ses répercussions dans le milieu interplanétaire restera un thème fédérateur des équipes solaires de la communauté PNST. Des progrès tant observationnels que théoriques sont à attendre dans les années qui viennent avec par exemple le développement de nouvelles simulations MHD, pour l'extrapolation des magnétogrammes vectoriels et le suivi des connectivités magnétiques, combinées à l'exploitation d'observations dans tout le spectre électromagnétique montrant la structuration et l'évolution des boucles coronales (données DPSM/THEMIS, XUV de SolarB et stéréoscopiques de SECCHI/STEREO, à plus long terme données d'imagerie et de coronographie UV de LYOT sur le projet de micro-satellite franco-chinois SMESE). La compréhension des processus d'accélération des particules énergétiques tant en interaction dans l'atmosphère solaire que dans l'espace interplanétaire bénéficiera de la poursuite de l'exploitation des données de spectro-imagerie X/ γ de RHESSI et des données du radiohéliographe de Nançay, mais aussi des diagnostics inédits qu'apporteront les observations bi-satellites de la mission STEREO (lancement 2006) qui fourniront à la fois la vue en latitude et longitude des éjections de masse coronale dont les ondes de chocs sont des accélérateurs potentiels des particules du milieu interplanétaire et l'exploration de la structure en longitude des flux de particules du milieu interplanétaire. A plus long terme, ces projets de recherche devraient bénéficier d'observations inédites à partir d'instruments dont les concepts devraient être portés à maturation dans les quatre prochaines années: imagerie radio des régions d'accélération des électrons dans la couronne solaire (projet américain de radiohéliographe FASR entre 0.1 et 30 GHz), observations en IR lointain (2 et 9 THz) du rayonnement synchrotron des électrons les plus énergétiques (télescope DESIR sur SMESE), mesures de neutrons d'origine solaire de qq MeV à bord de Solar Orbiter.

Les perspectives sur quatre ans de la thématique « chauffage de la couronne et formation du vent solaire » sont à la fois théoriques et observationnelles avec l'exploitation des données bi-satellites de la mission STEREO, dans laquelle l'implication de la communauté PNST a été et est importante sur le plan du développement d'instruments, et des données de SDO permettant notamment l'observation continue des CMEs. Bien évidemment la communauté PNST participera également activement à l'exploitation de la troisième orbite d'ULYSSE autour du Soleil, qui sera la deuxième en période de minimum solaire. Au-delà de l'exploitation de ces expériences, la communauté participera à la préparation de l'expérience Solar Orbiter de l'ESA et à la défense du projet de Sonde Solaire qui devrait visiter pour la première fois la couronne solaire *in situ*.

Les recherches menées autour du thème « interactions vent solaire-magnétosphère-ionosphère » seront poursuivies grâce à l'exploitation des données satellitaires de CLUSTER, Double Star et des données sol des réseaux de radars SuperDARN et EISCAT tant en ce qui concerne l'étude des frontières et interfaces de la magnétosphère terrestre avec le vent solaire que l'étude du couplage des plasmas de la queue magnétosphérique et de l'ionosphère aurorale. Les recherches théoriques et les modélisations seront également poursuivies: citons par exemple le développement de simulations particulières 3D pour l'étude du choc, et l'étude de la turbulence

dans le cadre de la formulation hamiltonienne des équations de la MHD Hall. Les résultats des missions coordonnées CLUSTER et Double Star ont montré l'intérêt des observations multi-satellites et c'est avec ce type de mission que la communauté PNST envisage de poursuivre l'exploration de la magnétosphère terrestre tout d'abord avec THEMIS(Time History of Events and Macroscale Interactions during Substorms) (projet NASA qui sera lancé en 2006), puis MMS (Magnetospheric Multi-Scale) (projet NASA dont le lancement est prévu en 2012). La communauté PNST participe également au groupe de définition du projet Cross-Scale qui sera proposé à l'ESA en collaboration avec la JAXA, l'agence spatiale japonaise, dans le cadre du programme Cosmic Vision. A l'interface PNST/PNP, la communauté sera impliquée dans les années qui viennent dans l'analyse des mesures de plasma et d'ondes faites par la sonde CASSINI dans la magnétosphère géante de Saturne, et dans la préparation de la mission Bepi-Colombo vers la magnétosphère miniature de Mercure.

L'étude des processus de couplages entre l'ionosphère et l'atmosphère terrestre devrait bénéficier dans les prochaines années de la mise en service au Dôme C d'un nouveau radar SuperDARN bi-faisceau permettant de compléter la couverture en longitude de la convection ionosphérique dans l'hémisphère sud et de mener des études comparatives inter-hémisphères. La sélection par le CNES du projet de micro-satellite TARANIS ouvrirait une thématique tout à fait nouvelle avec l'observation de phénomènes puissants mais fugitifs se produisant aux interfaces atmosphère/thermosphère/ionosphère et magnétosphère (« sprites, elfes,.. »), phénomènes quasiment inconnus il y a une quinzaine d'années.

La Météorologie de l'Espace, thématique transversale des relations Soleil-Terre, bénéficiera dans les années qui viennent de l'arrivée de nouvelles données pour étudier les différents maillons de la chaîne des relations Soleil-Terre. : les observatoires solaires STEREO (2006) et SDO (2007) pour l'étude des éjections de masse coronale (déclenchement, propagation dans le milieu interplanétaire), le satellite technologique PROBA2 (2007) de l'ESA avec de l'imagerie UV haute cadence, les microsatsellites du CNES, PICARD et TARANIS, pour l'étude du lien entre activité solaire, irradiance et climat, et du couplage stratosphère-ionosphère. Les instruments tels que SuperDARN, le radiohéliographe de Nançay, et à plus long terme le radiohéliographe FASR et le radar LOIS associé à LOFAR continueront de jouer un rôle clé respectivement pour la confection de cartes de la convection ionosphérique et pour les détections radio du déclenchement et de la propagation de CMEs. Le rôle du PNST est ici de veiller à ce que les besoins de cette thématique (qui peut utiliser beaucoup de données existant par ailleurs) soient pris en compte lors de la définition des modes d'observation d'un instrument ainsi que dans les bases de données et observatoires virtuels. Le PNST a aussi vocation à représenter sa communauté dans la définition de certains programmes européens.

La dotation globale du programme est revenue aujourd'hui à son niveau de 2002 après avoir connu une réduction de 33% en 2003 : la contribution de l'INSU est en 2005 de 212k€ et celle du CNES de 69,5k€, soit respectivement 75% et 25%. LePNST s'est efforcé de diminuer le nombre des petites opérations isolées et de privilégier les opérations plus importantes qui servent la communauté, par exemple le soutien des bases de données et de l'instrumentation au sol, les missions d'observations, et les collaborations entre équipes sur des objectifs clairement définis. De nombreuses opérations sont pluri-annuelles, et certaines sont récurrentes. Le PNST soutient des demandes ponctuelles pour l'organisation d'ateliers ou de colloques et organise des colloques nationaux avec une périodicité de l'ordre de deux années : les derniers ayant eu lieu à Autrans en janvier 2004, et à Paris en septembre 2005 : le programme de ce dernier colloque et la plupart des

présentations faites à cette occasion sont accessibles à l'adresse <http://www.ias.u-psud.fr/pnst/colloquePNST2005/programme.html> .

Le PNST rassemble un peu plus de 200 chercheurs, dont environ 30% de jeunes occupant des postes contractuels (doctorants et post-docs) : les trois quarts de cet effectif sont répartis dans 8 équipes de quinze à vingt chercheurs chacune et appartenant pour la plupart à des laboratoires spatiaux. Le dernier quart est constitué par des équipes de 4 à 6 personnes, et par une demi-douzaine de chercheurs isolés. Pour maintenir une communauté de 150 chercheurs titulaires, supposés actifs entre 30 et 65 ans, il faudrait recruter en moyenne 4,3 chercheurs par an tous organismes confondus (CNRS, Observatoires et Université) : force est de constater que nous sommes très loin du compte avec seulement 9 recrutements pendant la période 2002-2005 soit 2,25/an. La médiane de l'effectif des chercheurs titulaires de notre communauté se situe entre 55 et 56 ans alors qu'elle devrait être, idéalement, de 47 ou 48 ans. **Ce constat alarmant des ressources humaines du PNST est notre principal sujet d'inquiétude alors que l'activité scientifique dans le domaine des relations Soleil-Terre est particulièrement dynamique.**

Ce document présenté à la Commission Spécialisée d'Astronomie rassemble trois rapports (activité, prospective, administration) et quelques annexes. Le rapport d'activité pour la période 2002-2005 comporte six chapitres consacrés aux thèmes scientifiques du programme et deux chapitres consacrés aux bases de données et aux instruments au sol : *i*) formation et émergence des champs magnétiques solaire et stellaires, *ii*) magnétisme solaire (instabilités, éruptions, éjections de masse, particules de haute énergie), *iii*) chauffage de la couronne et formation du vent solaire, *iv*) interaction du vent solaire avec la magnétosphère, l'ionosphère et la thermosphère, *v*) processus fondamentaux dans les plasmas du système solaire, *vi*) relations Soleil-Terre et météorologie de l'espace, *vii*) bases de données, *viii*) instruments au sol. Le rapport de prospective considère les grands thèmes du programme mais son organisation diffère légèrement de la précédente : *i*) mesure des champs magnétiques dans l'atmosphère solaire, *ii*) magnétisme solaire et stellaire et structure interne, *iii*) magnétisme solaire (instabilités, éruptions, éjections de masse, particules de haute énergie), *iv*) chauffage de la couronne et formation du vent solaire, *v*) interactions vent solaire-magnétosphère-ionosphère, *vi*) processus ionosphériques et interactions avec l'atmosphère, *vii*) relations Soleil-Terre et météorologie de l'espace, *viii*) bases de données, *ix*) instruments au sol. Le rapport administratif *i*) présente le Conseil Scientifique et la direction du programme, et rappelle leurs tâches, *ii*) expose le budget du programme et son évolution au cours du mandat 2002-2005, *iii*) analyse les ressources humaines du programme, *iv*) analyse les publications de la communauté, *v*) considère les interfaces avec les autres programmes. Diverses annexes complètent le document : tableau financier quadriennal, liste des thèses, liste des publications dans les revues à comité de lecture, et liste des revues invitées.

Bilan scientifique 2002-2005

I. Formation et émergence des champs magnétiques solaire et stellaires

Le champ magnétique est un ingrédient clé pour la plupart des phénomènes solaires : chauffage de la couronne, accélération du vent, éruptions, CMEs et donc pour les études liées à la météo spatiale. Il est également à l'origine de la structuration de l'atmosphère solaire et du milieu interplanétaire. Sa génération pose la question, capitale, des dynamos solaire et stellaires, le Soleil offrant la possibilité, grâce à ses cycles d'activité bien documentés, de tester les modèles de dynamo. Mais la connaissance des phases les plus précoces de l'évolution stellaire permet aussi de comprendre l'histoire de notre Soleil.

Un certain nombre de résultats marquants ont été obtenus dans ce domaine au cours des quatre dernières années en ce qui concerne en particulier l'observation du second spectre solaire, la mesure des champs magnétiques dans les protubérances (dont certaines observations obtenues avec THEMIS/MTR), des observations du gradient vertical du champ longitudinal et d'oscillations dans les taches et l'observation de flux émergent à travers la surface solaire. Un programme d'observations original est par ailleurs mené en collaboration avec de chercheurs de l'ETH Zürich (Arnaud, Berdyugina, Fluri) pour l'étude de taches solaires simultanément dans des raies atomiques et moléculaires (programme réalisable seulement grâce à l'aspect multi-longueur d'onde de THEMIS). Les développements instrumentaux menés ces dernières années à la lunette Jean Rosch ont permis de mesurer des taux de polarisation séparément dans les granules et les intergranules (Roudier et al., 2003 ;2004), d'étudier la variation du champ magnétique turbulent avec la profondeur à partir des variations centre-bord de la polarisation linéaire de raies atomiques et moléculaires et de mettre en évidence la dynamique des éléments magnétiques à partir de mesures DPSM. Des projets de mesure de champ magnétique coronal dans le proche IR ont également été proposés par la communauté française (en particulier dans le cadre de la réflexion autour de dôme C), ceci en collaboration avec des groupes américains et italiens. Le PNST a soutenu un petit projet de « coronographie raie verte » au Pic du Midi (Koutchmy et collaborateurs) utilisant un miroir super-poli en Si de 15cm de diamètre. La communauté française a également participé à la soumission d'une demande de « design studies » dans le cadre du 6^{ème} PCRD autour du projet nord-américain ATST de télescope solaire de 4m dont les objectifs scientifiques sont la mesure du champ magnétique solaire ainsi que l'imagerie à haute résolution angulaire et la spectroscopie dans une large bande spectrale (voir chapitre de prospective).

Il faut enfin noter la mise en service d'ESPADONS, spectropolarimètre installé au CFHT et opérationnel depuis le début de l'année 2005, et dont les résultats, extrêmement prometteurs, portent sur une large gamme d'objets stellaires (e.g. Donati et al., 2005).

A. Polarisation atomique et moléculaire observée avec THEMIS et au Pic du Midi

L'observation du « second spectre solaire », spectre de polarisation linéaire observé au bord du soleil, totalement différent du spectre en intensité a été un thème fédérateur d'une partie de la communauté PNST au cours des quatre dernières années (une dizaine de chercheurs post-docs et thésitifs et organisation de deux ateliers en 2002 et 2004). Des observations ont été faites tant à THEMIS qu'avec le polarimètre de la lunette Jean Rösch à laquelle le PNST apporte un soutien scientifique et financier spécifiques depuis 2002. Cette polarisation est formée par la diffusion du rayonnement incident anisotrope, et diminuée sous l'effet des collisions dépolarisantes et du champ magnétique par effet Hanle. On peut ainsi déterminer l'intensité du champ magnétique par la mesure de la dépolarisation. Sans champ magnétique, la direction de polarisation est la direction radiale et un des diagnostics de la direction du champ est la rotation du plan de polarisation du rayonnement. L'interprétation du spectre de polarisation ouvre un terrain quasiment vierge pour les diagnostics spectro-polarimétriques qui s'appuient en dehors des observations sur la théorie des collisions dépolarisantes, la théorie du transfert de rayonnement avec redistribution partielle et modélisation du transfert de rayonnement polarisé avec champ magnétique.

- Observations de protubérances solaires avec THEMIS

Les protubérances sont des structures magnétiques ancrées dans la photosphère solaire et à l'origine de la condensation dans la basse couronne de quantités importantes de plasma coronal. La déstabilisation de ces structures est à l'origine des éjections de masse coronales potentiellement géo-effectives.

La mesure du champ magnétique dans ces protubérances est l'un des outils pour la compréhension, voire la prédiction de ces événements explosifs. Elle se fait de façon traditionnelle par mesure de l'effet Hanle en particulier dans la raie D3 de l'hélium à 5876 Å. Après les mesures pionnières faites dans les années 80 par Leroy et Bommier, les mesures de champ magnétiques par effet Hanle dans les protubérances ont été reprises au début des années 2000 (Paletou et al. 2001) en utilisant non plus des coronographes, mais des télescopes solaires ; en utilisant non plus des filtres étroits mais des spectrographes et en obtenant des spectres non seulement en polarisation linéaire mais aussi circulaire.

Le PNST a contribué par son financement à la partie instrumentale pour l'observation des protubérances dans la raie D3 de l'hélium à Locarno, puis à THEMIS à partir de 2001 et à l'achat d'optique pour THEMIS permettant de réaliser dorénavant ces mesures également dans la raie 10830 Å de l'hélium.

L'obtention de spectres en polarisation linéaire mais aussi circulaire a été fondamentale pour l'interprétation des profils de Stokes de la raie D3 pour des protubérances observées avec THEMIS /MTR (Lopez-Ariste and Casini, 2002) et avec l'Advanced Stokes Polarimeter (ASP) à Sacramento Peak (Casini et al, 2003) (haut figure I.1). Depuis 2001, les observations de protubérances sont menées systématiquement à THEMIS/MTR et ont donné lieu à un résultat original publié récemment (Lopez-Ariste et al, 2005) grâce au mode multi-raies de THEMIS/MTR (bas figure I.1). Des mesures simultanées des quatre paramètres de Stokes pour une protubérance mesurée dans la raie D3 de l'hélium, H α et CaII ont été obtenues. La mesure de la polarisation circulaire V en H α révèle l'existence d'une polarisation circulaire qui est non seulement non prévue par les modèles atomiques de l'atome d'hydrogène mais présente par

ailleurs un profil symétrique par rapport au centre de la raie qui ne peut être attribué à l'effet Zeeman. Une telle observation confirmée par une observation similaire à l'ASP à Sacramento Peak révèle en fait une sensibilité de la raie H α au champ électrique dans le plasma ambiant de l'ordre de 0.1 V/cm. La sensibilité de la raie au champ électrique résulte du couplage induit par effet Stark de sous-niveaux de structure fine du niveau haut d'H α entraînant un transfert de polarisation linéaire en polarisation circulaire. Signalons aussi les observations simultanées des émissions en NaD2 et M b2 qui semblent être corrélées avec le renversement de la raie H alpha(Stellmacher & Wiehr, 2005).

Par ailleurs, le système atomique de l'hélium comprend cinq niveaux atomiques donnant lieu à la fois à la raie D3 de l'Hélium mais aussi à une raie dans l'IR proche plus intense que D3 mais moins sensible à l'effet Hanle. L'intérêt de son observation réside dans sa formation fortement liée à celle de D3 qui devrait permettre des avancées dans le transfert de lumière polarisée dans les protubérances, transfert non inclus à l'heure actuelle dans le modèle de l'atome de He. Dans ce but, des premières mesures ont été effectuées en 2004 à THEMIS dans les deux raies de l'Helium et seront améliorées grâce à l'achat d'optique financé par le PNST.

Le financement du PNST a également permis de réaliser grâce à la présence de trois observateurs à THEMIS une autre campagne d'observations particulières de protubérances. Le suivi de protubérances sur plusieurs jours a permis de lever l'ambiguïté fondamentale sur l'orientation du champ grâce à des mesures de tomographie (voir exemple d'observations faites avec THEMIS DPSM/MTR dans 2 raies) (figure I.2)

- Théorie de la dépolarisation collisionnelle et redistribution partielle en transfert de rayonnement

Dans l'atmosphère solaire, la dépolarisation collisionnelle et la dépolarisation magnétique sont du même ordre de grandeur. On ne peut donc interpréter l'une sans tenir compte de l'autre. Des calculs précis de chimie quantique pour la dépolarisation des atomes simples ont été développés (Kerkeni et al., 2002 ; 2003 ; 2004) ainsi que des calculs semi-classiques plus légers et approchés pour le cas d'atomes plus lourds ou plus complexes (thèse de M. Derouich, et al., 2003 ; 2004 ; 2005). Ces calculs devraient être étendus à l'avenir vers l'étude de raies moléculaires.

Ces calculs ont été appliqués à la modélisation de la dépolarisation collisionnelle de Na I D2 hors du limbe et à l'interprétation de mesures de la polarisation de la raie Sr I 4607 A faites soit à THEMIS (Bommier et al., 2005), soit avec la lunette Jean Rösch du Pic du Midi. Les résultats concordent sur les observations d'un champ turbulent (i.e. dans toutes les directions dans le champ de vue) de 35 à 60 G et de vitesses turbulentes de 1.8 km/s (Roudier et al., 2004 ; Malherbe et al., 2004 ; Muller et al., 2005). Les observations faites sur l'intervalle de temps 2000-2004 n'ont pas montré jusqu'à présent de variation cyclique.

La redistribution partielle est un autre thème dans lequel les équipes du PNST sont compétitives (Fluri et al., 2003). Ces études devraient permettre l'interprétation de la raie Ca I 4227 récemment observée au Pic du Midi et dont le cœur est sensible à B mais pas les ailes, ce qui permet une mesure de B par effet Hanle différentiel.

- Observation de la polarisation de raies moléculaires avec THEMIS et la lunette Jean Rösch et interprétation

Des mesures de polarisation de raies moléculaires du second spectre solaire ont été obtenues avec THEMIS. Ces raies sont en général optiquement minces donc interprétables facilement sans transfert de rayonnement et nombreuses ce qui permet d'effectuer des mesures par rapport de raies et effet Hanle différentiel (Faurobot and Arnaud, 2002 ; 2003). Une limite inférieure des champs magnétiques turbulents de l'ordre de 7 G a été obtenue sans tenir compte de la dépolarisation collisionnelle. Des observations dans des raies moléculaires (C2 et TiI) ont également été réalisées avec le polarimètre de la lunette Jean Rösch.

- Observations de polarimétrie à la lunette Jean Rösch du Pic du Midi

La période 2002-2004 a été une période de réalisations instrumentales pour le polarimètre à cristaux liquides. Les qualités de cette lunette ont été démontrées pour l'étude du second spectre dans le domaine du bleu et avec de la résolution spatiale. C'est un point important pour l'étude des variations spatiales du second spectre liées à la granulation solaire. L'apport de la lunette Jean Rösch est en particulier d'obtenir des observations avec de la résolution spatiale dans la raie Sr I 4607 A en utilisant une fente perpendiculaire au bord solaire. L'interprétation des spectres a été faite en utilisant le modèle basé sur la théorie du transfert de rayonnement polarisé développé par Landi Degl'Innocenti (1999) et les calculs de taux de dépolarisation par collisions de Derouich. Les observations montrent une variation du champ avec l'atmosphère passant de 40 G à une trentaine de Gauss à une altitude de 300 km (voir figure I.3) (Derouich et al, en cours de publication).

B. Observations à haute résolution spatiale de l'émergence du champ magnétique

Les observations à haute résolution du champ magnétique vectoriel effectuées lors d'un lancement de ballon en Antarctique en 2000 combinées avec un calcul du champ ont permis d'analyser de façon précise l'émergence de tubes de flux. Lors de l'émergence, le tube de flux est tangent à la photosphère (zones chauves= « bald patches », i.e. sans lignes de force ancrées verticalement), dans des régions où les lignes de champ peuvent se reconnecter et donner naissance à des bombes d'Ellerman (Schmieder et al., 2004; Pariat et al., 2004). Lorsque les tubes atteignent 100 km ils donnent ensuite naissance aux filaments, puis aux boucles coronales. Ce type de programme d'observations se poursuit au Pic du Midi et à THEMIS

C. Gradient vertical de champ magnétique dans les tâches

Des cartes de champ magnétique longitudinales obtenues avec le DPSM de THEMIS ont permis d'étudier le gradient vertical du champ dans les tâches (Eibe et al., 2002) et ont permis de montrer que le champ magnétique subit de fortes modifications entre la photosphère et la chromosphère avec ouverture des tubes de flux. Les gradients verticaux mesurés sont plus forts que ce qui est déduit des extrapolations. Des observations faites à THEMIS (DPSM) dans la raie Ca II 8542 ont également permis d'étudier des oscillations dans la pénombre des tâches (Tziotziou et al., 2002).

D. Cyclicité magnétique

Un paramètre global mesuré jusqu'ici uniquement au sol est le diamètre solaire. Ces observations effectuées notamment au CERGA/OCA ont mis en évidence des variations avec le cycle, très discutées. La mission spatiale PICARD devrait donner, même sur un court laps de temps, des indications absolues sur le sens de ces variations. En complément, l'équipe de l'OCA (S. Lefebvre, J.-P. Rozelot, A. Mangin) a développé un instrument (MIRE SOL) et un algorithme ayant pour objet la localisation des structures actives susceptibles de parasiter la détermination du diamètre (Lefebvre, S. & Rozelot, J.-P., 2004).

E. Champs magnétiques stellaires

Dans le domaine des étoiles de type solaire, les études (notamment à l'AAT) ont permis de montrer que la structure magnétique est progressivement plus complexe et moins équatoriale quand la rotation de l'étoile augmente. Par ailleurs, une étude quantitative de l'activité coronale des étoiles de type solaire incluant des observations simultanées en X et en radio a été menée avec Chandra et l'AAT. ESPaDON S, un spectropolarimètre de nouvelle génération pour le télescope Canada-France-Hawaii (CFHT), a été installé sur le télescope à l'été 2004, puis testé sur le ciel au cours de l'automne 2004. Les performances sont conformes aux attentes, ce qui en fait l'instrument le plus efficace au monde pour ce genre de programme. Notons, dans la moisson de résultats obtenus en quelques 60 nuits, la toute première cartographie magnétique d'une étoile T Tauri, qui devrait permettre de tester de manière plus réaliste les modèles de couplage magnétique entre étoile et disque d'accrétion (Figure I.4).

Financé principalement dans le cadre du plan Etat-Région Midi Pyrénées (le PNST a apporté un complément en 2005), le spectropolarimètre NARVAL est maintenant en phase d'intégration, et doit être installé au TBL au début 2006. Il devrait être opérationnel dès l'été 2006.

Au total, près de 50 publications sont directement issues de l'exploitation des données spectroscopiques ou spectropolarimétriques obtenues à l'AAT, au TBL (MuSiCoS) ou au CFH (ESPaDON S).

La technique de spectro-polarimétrie interférométrique (SPIN) permet d'obtenir une information spatiale pour chaque composante d'un multiplet Zeeman et consiste à introduire un polarimètre au foyer d'un interféromètre optique longue-base. Cette technique a dans un premier temps été validée dans le cadre d'une collaboration théoriciens/observateurs afin de diagnostiquer les effets du magnétisme et de valider la technique pour des étoiles de type Ap (thèse Le Bouquin). Cette validation est basée sur un code de transfert radiatif en lumière polarisée. Les observables interférométriques ont été calculées pour différentes configurations de l'instrument. Les signaux de phase interférométriques pour différentes étoiles Ap ont été simulés et du temps garanti a été obtenu sur l'instrumentation proche-infrarouge AMBER du VLTI pour observer 2 étoiles Ap (Rousselet-Perraut et al., 2004). Des observations ont par ailleurs été réalisées avec le mode polarimétrique du GI2T/REGAIN ainsi que des observations au VLT.

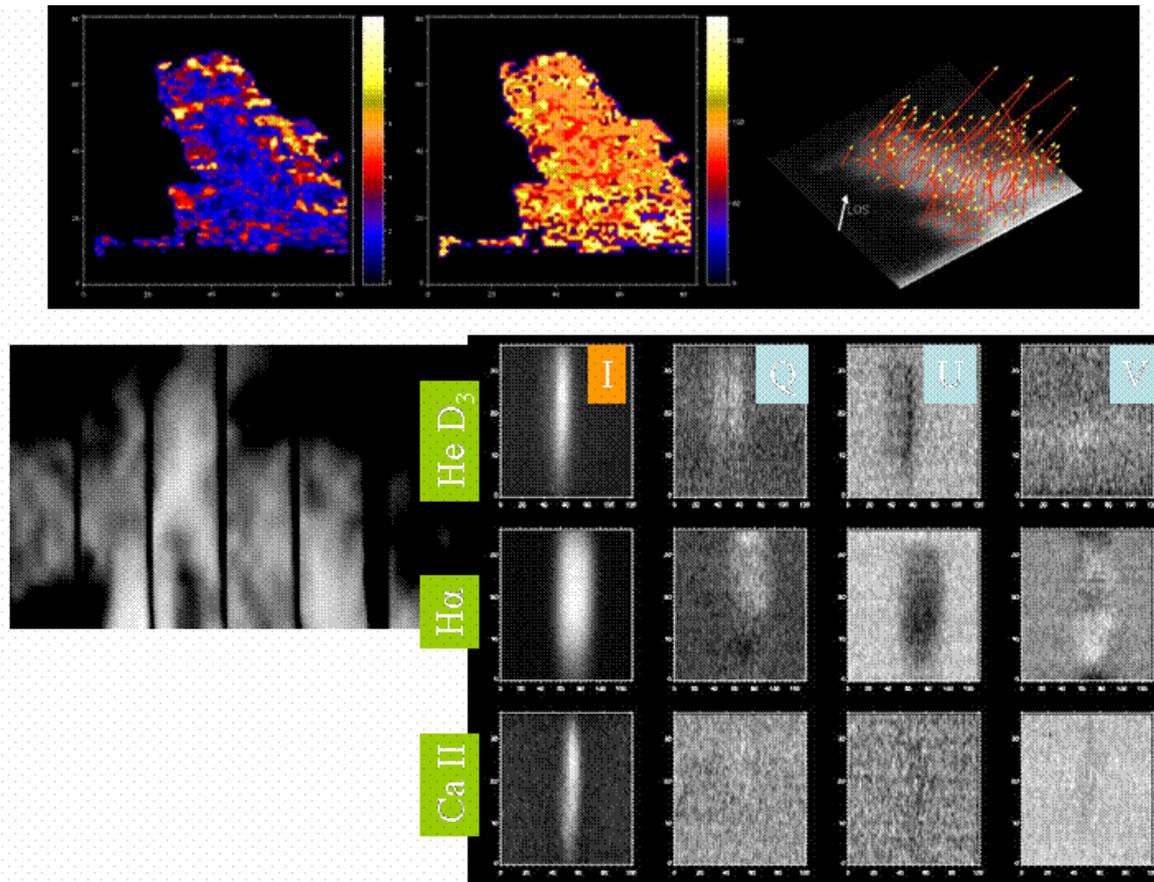


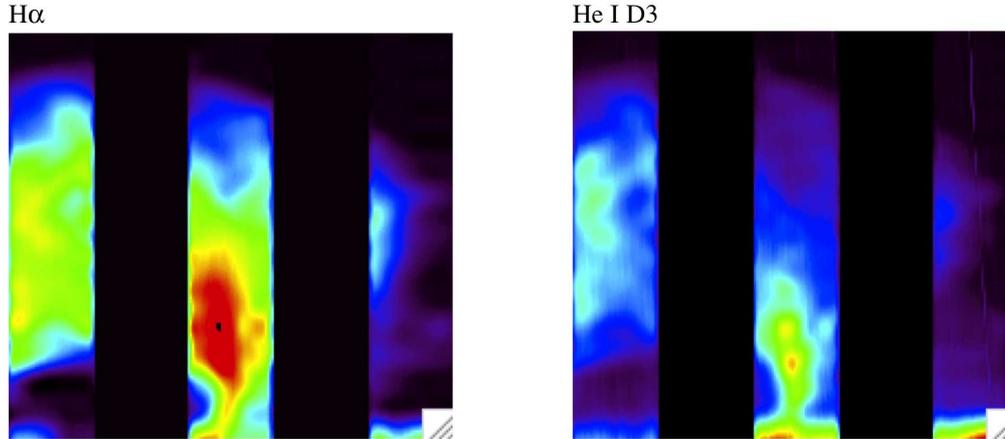
Figure I.1 : En haut, les 3 figures de gauche à droite montrent la force et l'inclinaison du champ magnétique mesurés sur une protubérance dans la raie D3 de l'Hélium avec l'Advanced Stokes Polarimeter à Boulder. (Casini et al., 2003) ainsi que à droite la protubérance telle qu'elle est observée en intensité, les flèches orientées représentant le champ magnétique.

En bas à gauche, image en H α d'une protubérance reconstruite à partir du spectre et paramètres de Stokes observés simultanément avec THEMIS/MTR pour cette protubérance dans les 3 raies He D₃, H α et CaII à 8542 Å. Le profil polarisé Q et U de la raie D₃ de l'He montre la polarisation par diffusion. Les raies D₃ et H α montrent aussi de l'effet Hanle (signal en U). La polarisation circulaire (V) observée pour H α est cependant inattendue et est interprétée comme la signature de champs électriques dans le plasma de la protubérance (Lopez-Ariste et al., 2005)

THÉMIS protubérances DPSM/MTR(grille)

18 juillet 2004 matin

protubérance à AP=57.5°
très élevée avec une polarisation importante en H α au sommet



Polarisation en He I D3 moyennée au travers du barreau central, à mi-hauteur

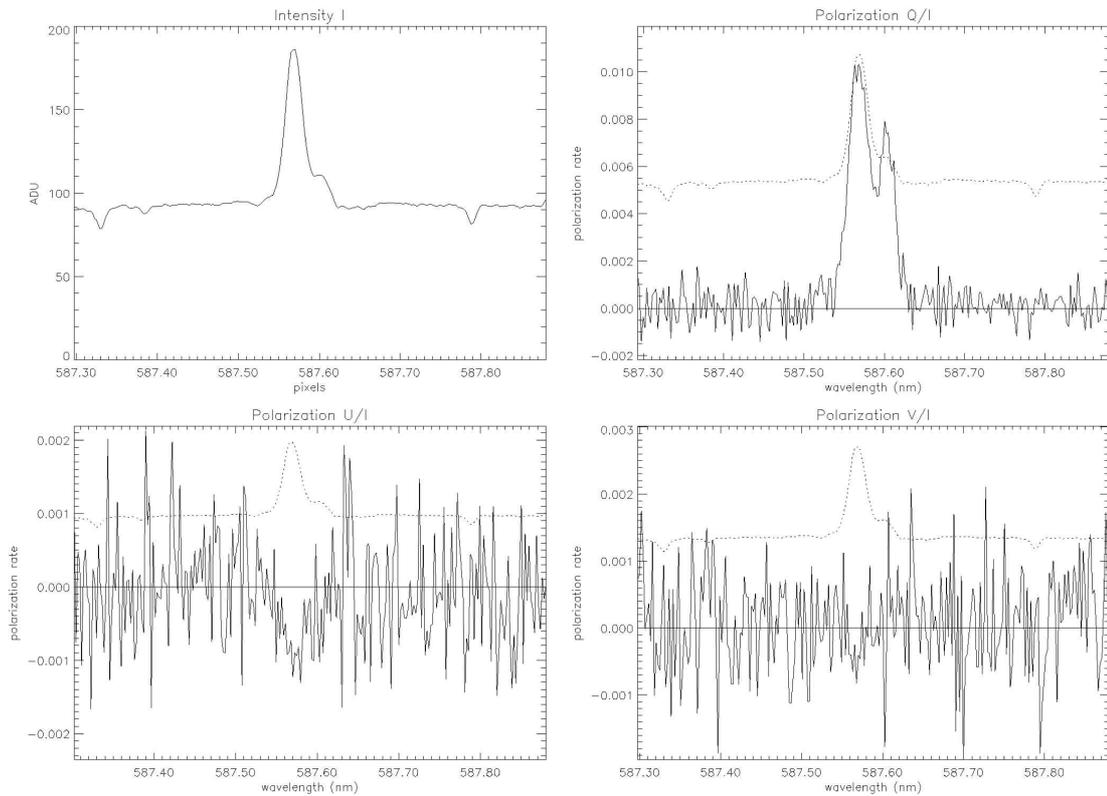


Figure I.2 Quelques profils de polarisation de la raie He I D3 d'une protubérance observée avec THEMIS le 18 juillet 2004 (Bommier et al., document interne)

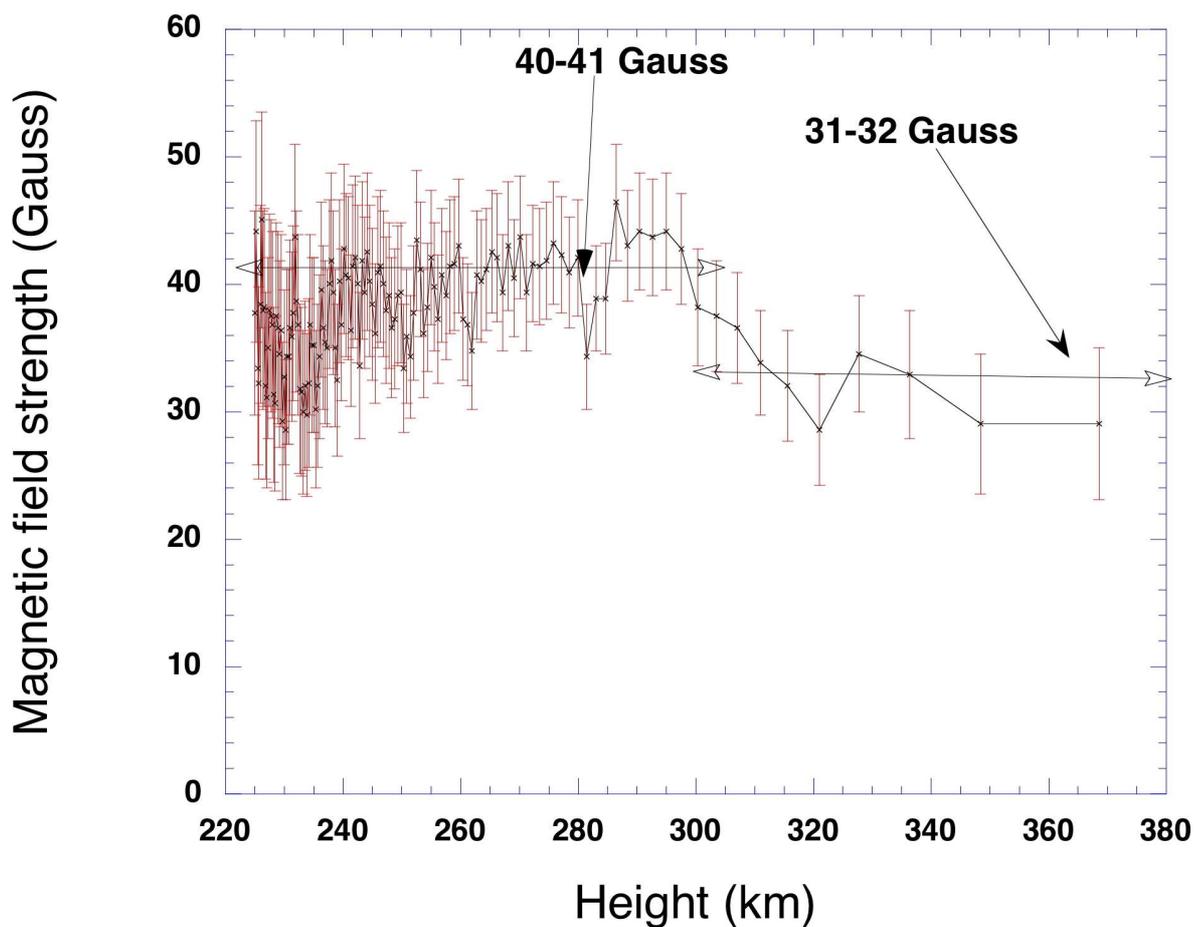


Figure I.3 Variation de l'intensité du champ magnétique turbulent (en Gauss) avec la hauteur dans l'atmosphère (repérée par rapport au niveau $\tau_{5000}=1$), à partir de l'interprétation des données Pic-du-Midi du 14 mai 2004 dans la raie Sr I 4607 Å. (Derouich et al., en préparation)

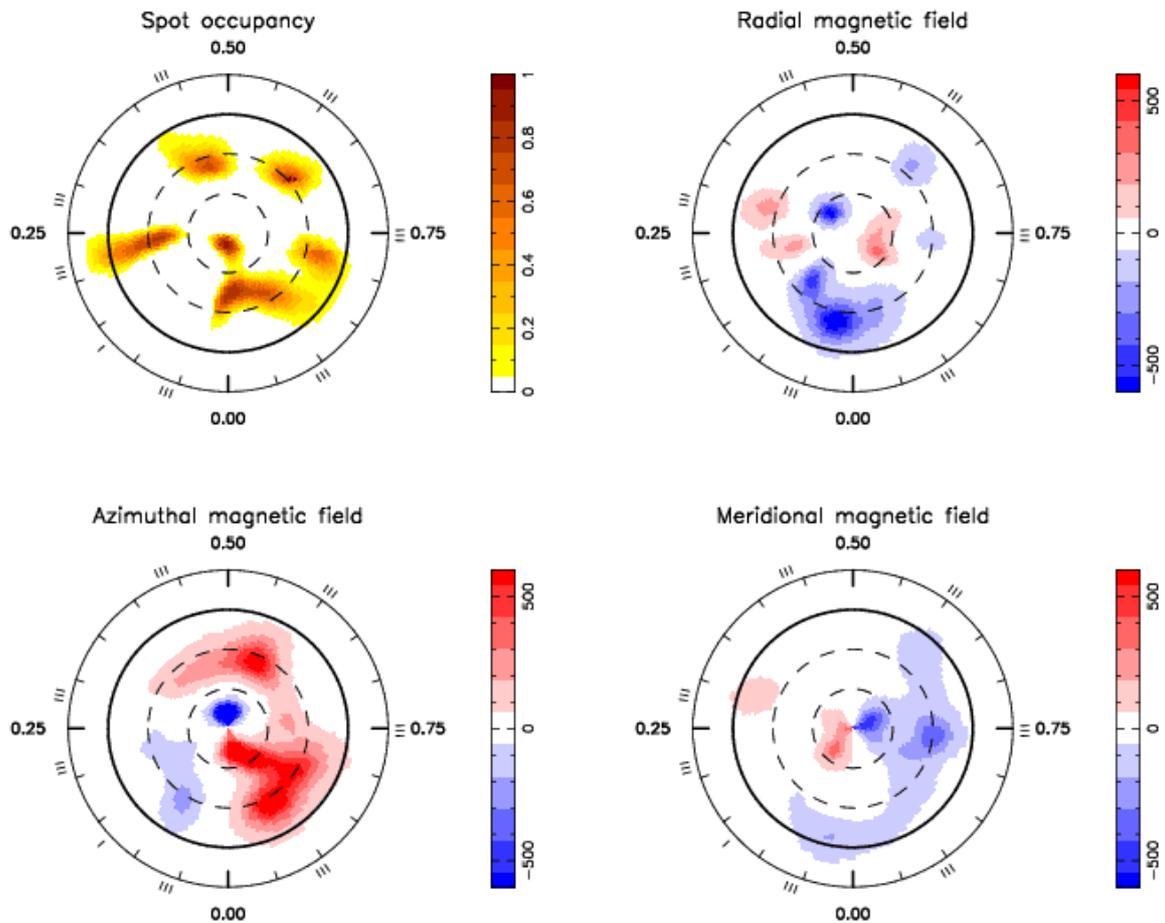


Figure I.4: Cartographies en brillance (en haut à droite) et en champ magnétique (composantes en coordonnées sphériques) de la T Tauri V2129 Oph déduite à partir de données spectropolarimétriques obtenues avec ESPADONS en Juin 2005. L'étoile est ici montrée en représentation polaire, chaque cercle concentrique en pointillé représentant un parallèle (l'équateur étant noté par un trait gras continu). Le champ magnétique photosphérique n'inclut pas de composante dipolaire de plusieurs kG, mais exhibe au contraire une topologie très complexe incluant notamment une composante azimutale très intense (JF Donati et al 2005, en préparation).

II. Magnétisme solaire : instabilités, éruptions, éjections de masse, particules de hautes énergies

A. Les éruptions solaires

- Configurations magnétiques éruptives

Le champ magnétique et son évolution déterminent les processus de conversion d'énergie qui sont à l'origine des éruptions et éjections de masse. La compréhension de ces processus, qui ont lieu à des échelles subtélescopiques, passe par deux ingrédients : observations détaillées en spectro-imagerie des manifestations des éruptions (chauffage du plasma, accélération de particules) et modélisation des configurations magnétiques dans la couronne à partir des mesures dans la photosphère. Dans les dernières années, la modélisation a fait des progrès importants en avançant des configurations 2D idéalisées à des structures tridimensionnelles.

Des configurations plus générales que la traditionnelle topologie avec point X ont été analysées, en généralisant les séparatrices aux « quasi-séparatrices layers » (QSLs ; Titov, Hornig & Démoulin, 2002). Les observations détaillées en imagerie (SoHO, TRACE, RHESSI) suggèrent que les éruptions sont déclenchées par l'interaction entre un flux magnétique émergent et une configuration magnétique cisailée dans la couronne (Berlicki et al. 2004). Une topologie magnétique particulière, où les lignes de champ sont tangentes à la frontière du domaine où le champ est sans force (la photosphère dans le cadre solaire), a été mise en évidence dans divers types d'activité éruptive (Mandrini et al. 2002). Les premières observations coordonnées entre RHESSI et la spectroscopie et l'imagerie radio métrique/décimétrique (RH Nançay, Zürich) confirment l'accélération des particules dans un environnement magnétique complexe et hautement dynamique, incluant des configurations macroscopiques qui suggèrent la reconnexion au-dessus de boucles coronales (Vilmer, Krucker, Lin, RHESSI team, 2002 ; Vilmer, Krucker, Trotter, Lin, 2003a).

Plusieurs mécanismes qui peuvent entraîner la déstabilisation de grandes structures et engendrer des éjections de masse ont été étudiés par la théorie et la modélisation MHD. Un code de simulations numériques MHD 3D a été développé et appliqué dans un premier temps à une analyse paramétrique complète des propriétés de stabilité des tubes de flux torsadés non-cylindriques (Aulanier et al. 2005). Il a été démontré que plusieurs types de processus conduisent à la disruption violente de grandes structures : des mouvements photosphériques convergents, qui sont effectivement observés (Amari, Luciani, Aly, Mickic, Linker 2003a), la diffusion turbulente photosphérique (Amari, Luciani, Aly, Mickic, Linker 2003b) et un taux suffisamment élevé d'émergence de flux magnétique, quand l'énergie de la configuration devient « proche » ou égale à celle de l'énergie du champ ouvert qui représente une borne supérieure pour l'énergie de tout champ sans-force en équilibre. Ce dernier mécanisme de disparition de flux implique également un changement de topologie forcé au niveau photosphérique (Linker et al. 2003). Pour progresser dans la recherche des mécanismes d'instabilités, il faut une formulation de conditions aux limites pour l'évolution MHD coronale induite par un modèle subphotosphérique d'émergence des tubes de flux. Des premiers pas dans cette direction ont été entrepris (Amari, Aly, Luciani 2004, 2005). La reconnexion magnétique et la création d'un tube de flux torsadé sont des ingrédients pré-éruptifs importants. Il est donc important de pouvoir déterminer la

structure magnétique de ces configurations pré éruptives. Ceci implique le développement de méthodes de reconstruction non linéaires qui injectent en conditions aux limites les courants électriques mesurés au niveau photosphérique, accessibles par les magnétographes vectoriels.

- Particules de hautes énergies : accélération et transport

Les particules accélérées se révèlent de plus en plus comme un constituant fondamental du plasma coronal. Elles se manifestent par des émissions électromagnétiques directes - rayons X durs et γ dans la basse couronne et la chromosphère, ondes radio à des altitudes plus élevées – et indirectement par l'excitation d'atomes et le chauffage du plasma visibles en EUV, rayons X mous ou lumière visible. Divers processus d'accélération, mettant en jeu des champs électriques quasi-continus dans les nappes de courant, des ondes de choc ou la turbulence engendrée lors de la reconnexion magnétique, sont actuellement en discussion.

Les chercheurs français ont joué un rôle de premier plan dans l'exploitation des expériences en rayons X/ γ (Phébus/GRANAT – instrument du CESR dont l'exploitation pour la physique solaire reposait sur l'expertise à l'Observatoire de Paris ; BATSE/CGRO, RHESSI). Le rayonnement γ est d'une importance primordiale parce qu'il contient les seuls diagnostics radiatifs directs des ions et nucléons de hautes énergies. La modélisation du rayonnement du continuum nucléaire au-dessus de quelques dizaines de MeV et la comparaison avec des protons au-dessus du MeV déduits des raies γ montre que le spectre des protons accélérés comporte des « cassures » entre quelques MeV et quelques GeV (Vilmer et al. 2003b).

Une surprise majeure est venue de la première imagerie en rayons γ avec RHESSI : alors qu'il était généralement admis que les électrons et ions étaient accélérés ensemble lors des grandes éruptions solaires, RHESSI montre que les sites émetteurs peuvent être différents (Lin et al., 2003, Hurford et al., 2003) ! L'interprétation n'en est qu'à ses débuts : les protons sont-ils accélérés dans des boucles magnétiques de plus grande taille que les électrons ? D'autres observations ne montrent pas la différence des sources avec la même netteté, sans qu'on puisse conclure à la cospatialité exacte. Mais la dynamique des images est encore limitée, comme le montrent des études stéréoscopiques avec des spectromètres sans résolution spatiale : elles mettent en évidence des sources émettrices aussi bien dans la chromosphère que dans la basse couronne, bien que la densité ambiante favorise l'émission dans la chromosphère ; et des sources de photons jusqu'à des énergies de plusieurs dizaines de MeV peuvent faire une contribution non négligeable à l'émission totale en rayons X durs, et rester cachées aux imageurs actuelles (Trottet et al. 2003).

Les premières observations des éruptions à des fréquences > 200 GHz ont été fournies depuis trois ans par des instruments brésilien (SST; Andes argentines) et germano-suisse (KOSMA ; Gornergrat). Ces observations montrent notamment la contribution des électrons relativistes au spectre millimétrique-submillimétrique (Trottet et al. 2002), mais des indications pour d'autres populations de particules, thermiques ou ultra relativistes (électrons ou positrons), ont également été trouvées et sont actuellement à l'étude.

Les travaux menés précédemment sur les propriétés statistiques des éruptions X et leur modélisation par des modèles d'avalanches et l'utilisation d'automates cellulaires (p. ex. Krasnosselskih et al. 2002) sont actuellement élargis à la simulation des spectres de particules accélérées. Nous avons calculé les spectres des électrons et du rayonnement X associé dans le cas de l'accélération stochastique par des champs électriques, issus d'un modèle d'automate cellulaire basé sur l'évolution d'un système auto-organisé. (Anastasiadis et al. 2004). Nous étendons ce travail au problème de l'accélération des ions dans les éruptions solaires (Dauphin et al. 2004).

La phase impulsive des éruptions solaires est bien connue pour produire des flux importants de particules non thermiques, contenant une énergie comparable à l'énergie totale convertie lors d'une éruption. En revanche, dans la phase graduelle d'un événement analysé en détail (THEMIS/DPSM, SoHO, TRACE, RHESSI ; Berlicki et al. 2004) l'énergie totale des électrons non thermiques au-dessus de 10 keV s'avère négligeable devant l'énergie thermique du plasma. Les populations thermiques et non thermiques sont trouvées dans les boucles éruptives, en accord avec les scénarios de reconnexion de structures magnétiques ouvertes lors d'une éjection de masse. Fait important : même dans cette phase tardive des éruptions il existe des indications en ondes radio métriques d'électrons relativistes (Dauphin et al. 2005)

La polarisation de certaines raies en lumière visible est un traceur des processus d'apport d'énergie à la chromosphère. THEMIS/MTR permet de mesurer simultanément la polarisation du rayonnement tout au long du profil de plusieurs raies spectrales formées à différentes profondeurs. C'est un diagnostic des faisceaux de particules dans la chromosphère, car leur bombardement conduit à l'émission de raies atomiques polarisées linéairement. La polarisation linéaire de raies telles que H_{β} et H_{γ} de l'hydrogène a effectivement été détectée lors de quelques éruptions (Hénoux et Karlicky 2003 ; Karlicky et Hénoux 2002 ; Xu et al. 2005). Sa direction est en accord avec celle attendue si l'atmosphère est bombardée par des faisceaux d'électrons de haute énergie. C'est la première confirmation de l'existence de courants de retour, requis pour neutraliser les faisceaux de particules accélérées (Figure II.1).

B. Ejections de masse (CME)

- Structure, instabilité, éjection dans l'Héliosphère

Les filaments, structures de plasma froid suspendu dans la couronne chaude ambiante, sont des traceurs privilégiés des configurations magnétiques dans la couronne, et l'une des rares structures coronales où l'on dispose de mesures du champ magnétique. Les filaments sont une structure de base qui devient instable lors des éjections de masse et leur fournit la matière. Ils sont donc un objet de choix pour comprendre la topologie magnétique des grandes structures coronales et leur évolution vers l'instabilité.

Les protubérances et filaments sont des structures pré-éruptives que l'on retrouve dans les éjections de masse. Grâce à l'établissement du premier atlas UV des protubérances (Parenti et al. 2004, 2005), il est possible d'établir un meilleur diagnostic, notamment en température (Parenti et al. 2005b) et de mettre des contraintes sur la région de transition protubérance-couronne (Cirigliano et al. 2004). Les filaments observés dans la raie H_{α} sont associés à des structures

plus étendues vues à d'autres longueurs d'ondes, par exemple dans les images coronales en EUV. Cela révèle de la matière froide autour des filaments que l'on ne voit pas en H_{α} . L'augmentation de la masse du filament ainsi mise en évidence pourrait signifier que la masse froide contenue dans les CMEs est plus grande que l'on ne pensait (Schmieder et al, 2002 ;2003 ; Heinzl et al. 2003 ; Aulanier et Schmieder 2002). Par ailleurs, l'analyse des modes d'oscillations (observations conjointes CDS/THEMIS) a permis la détection d'ondes MHD dans un filament de région active (Régnier et al. 2002).

Un aperçu de la structure magnétique éjectée lors d'une CME peut être dégagée par l'imagerie conjointe en lumière visible, EUV/X et radio. Des études de cas mettent en évidence la montée d'une structure magnétique confinant des électrons non thermiques (source radio mouvante) au-dessus de sources stationnaires ou à montée lente (Klein et Mouradian 2002, Pick et al. 2005). Ces observations sont entièrement compatibles avec le scénario de reconnexion entre boucles magnétiques cisailées, entraînant la formation d'un tube de flux torsadé qui monte rapidement dans la couronne (source radio mouvante) et de boucles fermées sous-jacentes à des hauteurs croissantes, au fur et à mesure que la reconnexion progresse (Pick et al. 2005). Une autre observation (TRACE) montre une torsion à grande échelle d'une protubérance qui est compatible avec une instabilité de type kink d'un tube de flux torsadé (Williams et al. 2005). Les observations systématiques obtenues depuis une dizaine d'années avec le coronographe H alpha HACO du Pic ont fourni des données aujourd'hui étalonnées et accessibles à partir de BASS 2000 (Romeuf et al., 2005). Cette initiative qui repose sur les interventions des Observateurs Associés a fait beaucoup pour la popularisation de la coronographie solaire.

L'identification des structures coronales pré-éruptives reste une difficulté dans l'étude des mécanismes de déclenchement des éjections de masse et de leur dynamique dans la basse couronne. En effet, les structures pré-éruptives sont observées sur le disque, mais les éjections de masse le sont sur le limbe, par des coronographes dont le champ de vue ne comprend en général pas la basse couronne. La combinaison avec des observations EUV et radio a néanmoins permis des progrès majeurs pendant la mission SoHO, malgré les limitations par le caractère 2D des observations.

L'imagerie radio (RH Nançay) et la coronographie (LASCO) ont montré que plusieurs CMEs, associées aux éruptions atteignent leur extension angulaire dans la basse couronne sur des échelles de temps de quelques minutes, par une série d'interactions magnétiques (sans doute des reconnexions) successives. La progression depuis le site éruptif est associée à une onde de Moreton, traceur chromosphérique d'une onde de choc coronale (Pohjolainen et al. 2005, et travaux antérieurs du groupe). Un autre processus de déclenchement est lié à présence de points nuls du champ magnétique coronal (Figure II.2.c, d). La CME atteint alors quasi-instantanément son extension angulaire, des sources radio deviennent brillantes dans un grand volume en un très petit laps de temps (Figure II.2.a). Les observations sont cohérentes avec la reconnexion magnétique aux points nuls, localisés par l'extrapolation du champ mesuré dans la photosphère. Ceci milite en faveur d'un modèle « breakout » généralisé (Maia et al., 2003).

Une notion particulièrement importante apparue dans les recherches sur les structures magnétiques coronales des dernières années est l'hélicité magnétique. L'hélicité magnétique de tout le système est conservée du Soleil à la Terre. Sa distribution globale et structurale à la

surface du soleil reflète les processus sous la photosphère. Cette même hélicité se retrouve dans les nuages magnétiques expulsés du soleil et conserve le signe qu'avait la CME : positif dans l'hémisphère sud du soleil et négatif dans l'hémisphère nord. La conservation de l'hélicité magnétique nous donne une clef pour relier des mesures ponctuelles à 1 UA de structures magnétiques à leurs origines dans la couronne solaire.

L'hélicité magnétique a été étudiée dans les régions actives (éruptions, CME) et dans des nuages magnétiques. Démoulin et al. (2002a) ont montré théoriquement que les mouvements de cisaillement photosphérique et de rotation différentielle injectaient peu d'hélicité magnétique dans la couronne. Le bilan d'hélicité évalué sur toute la durée de vie d'une région active observée, tenant compte de la perte dans l'ensemble des éjections de masse associées à ces régions actives, montre que l'apport par la rotation différentielle est trop faible d'un facteur de 4 à 20 (Démoulin et al 2002a,b, Green et al. 2002), voire de signe opposé.

Un effort spécifique est actuellement mis sur la détermination plus précise des nuages magnétiques afin de contraindre l'hélicité éjectée dans les CMEs à partir de mesures in situ (Mandrini et al. 2004, 2005). Ceci apportera une contrainte importante dans l'établissement des effets interplanétaires de l'activité solaire. Vilmer et al. (2003b) ont montré, par une étude systématique des origines solaires des nuages magnétiques et ondes de choc, que des éjections de masse sont en général détectées dans la couronne avant ces perturbations à 1 UA, mais qu'elles sont la plupart du temps accompagnées d'activité éruptive en rayons X ou ondes radio.

C. Événements à particules

Les éruptions solaires et les éjections de masse sont les sources potentielles des flux accrus transitoires de particules dans l'Héliosphère (événements à particules). Une idée qui a trouvé un large écho dans les années 1990 préconise une distinction nette : d'un côté les événements produits lors des éruptions, conjointement avec les électrons et noyaux vus dans la basse atmosphère par leurs rayonnements X dur et γ , de l'autre les événements à particules les plus énergétiques, attribués aux ondes de choc que l'on suppose être engendrées par les éjections de masse les plus rapides.

Un argument clef pour l'action des ondes de choc a été le temps d'arrivée des particules au satellite. Les observations du RH de Nançay, des spectrographes radio incluant le réseau décimétrique de Nançay et le spectrographe WAVES sur Wind, et les détecteurs de particules à bord des satellites ACE, Wind et SoHO ont été utilisées pour identifier les processus d'accélération dans la couronne lors de l'injection de particules énergétiques dans l'Héliosphère. L'accent a été mis sur les démarrages des événements à particules, puisque c'est un instant qui peut être clairement identifié et comparé avec des processus dynamiques dans la couronne (Maia et Pick 2004 ; Klein et al. 2005 ; Klein et Posner 2005). Deux cas de figure ont ainsi été mis en évidence :

Les particules détectées in situ sont accélérées avec des électrons émetteurs du rayonnement radio dans la couronne lors d'événements « impulsifs » simples.

Les électrons peuvent être injectés dans l'Héliosphère à différents instants lors d'une éruption prolongée (> 10 min). Les observations radio suggèrent que les particules sont injectées au Soleil dans différents tubes de flux, et que l'instant de leur première détection in situ dépend du tube de flux spécifique auquel une sonde donnée est connectée.

Des « retards » d'injection n'indiquent donc pas nécessairement le laps de temps requis pour que l'onde de choc d'une CME accélère ces particules. On ne peut certes pas exclure que le choc d'une éjection de masse contribue à l'accélération des particules qui s'échappent, mais il a été montré

que des éjections rapides sans signature radio d'accélération dans la couronne ne produisent que de faibles événements à particules à des énergies >1 MeV (Marqué et al. 2005) ;

que le nombre et l'énergie des électrons accélérés par un choc coronal révélé par son émission radio (« sursaut de type II ») sont de plusieurs ordres de grandeur inférieures aux valeurs atteintes par les mécanismes qui accélèrent les électrons émettant le rayonnement X dur dans la basse couronne et la chromosphère (Klein et al. 2003).

Le rôle des CME dans les événements à particules n'est pas restreint à celui d'accélérateur. Les CME peuvent jouer un rôle clef dans la propagation des particules de hautes énergies du Soleil à la Terre. Miroshnichenko et al. (2005) mettent en évidence un nouveau cas où une partie des particules se propage vers la Terre dans un tube de flux de CME, ce qui permet de comprendre l'arrivée directe de protons à la Terre depuis une région éruptive à l'est du méridien central du Soleil.

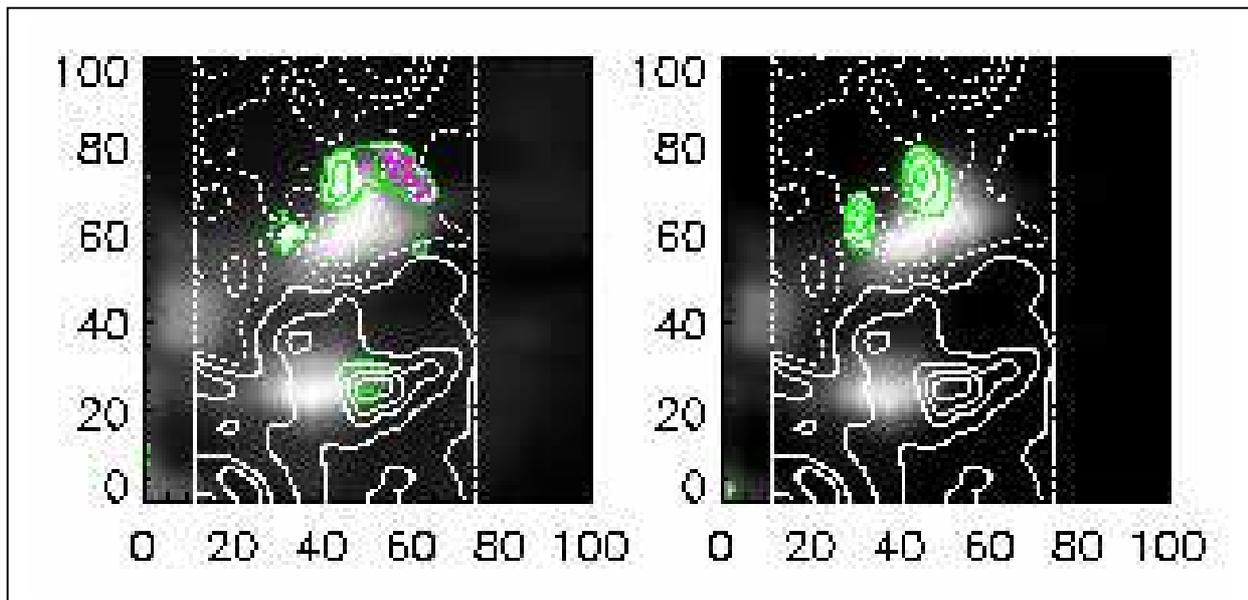
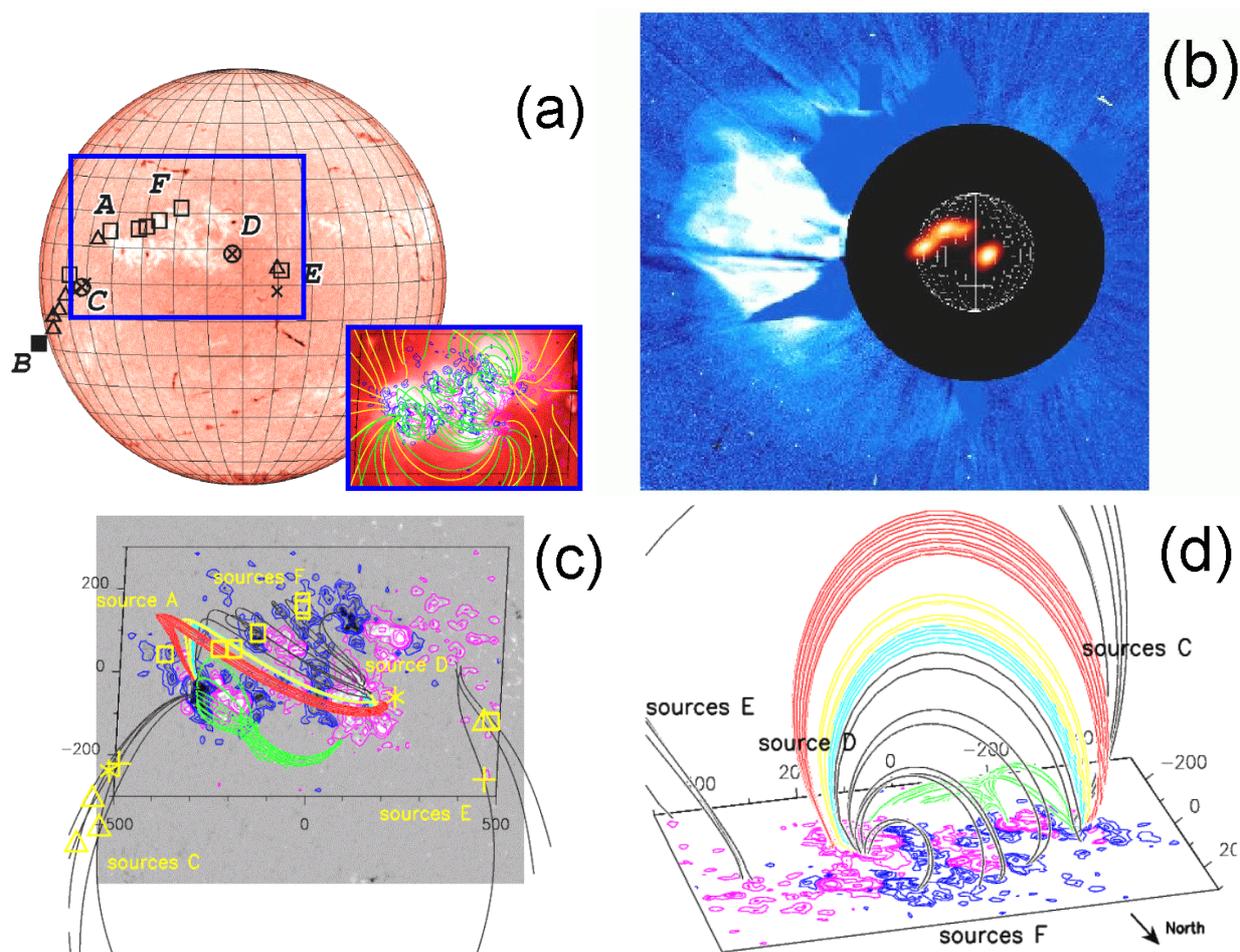


Figure II.1 : Distribution spatiale de la polarisation linéaire dans les raies $H\alpha$ (gauche) et $H\beta$ (droite) observées à 10:07 UT le 15/06/01 et distribution du champ magnétique longitudinal superposées. Les niveaux de polarisation représentés sont respectivement, 2.2, 3.3, 4.4% en $H\alpha$ et 3.5, 4.4 et 5 % en $H\beta$. En vert la polarisation radiale et en rouge la polarisation tangentielle (Hénoux et Karlicky, 2003). Les deux orientations de polarisation proviennent d'une part des électrons non thermiques précipités, d'autre part des courants de retours qui les neutralisent.

Figure II.2: (a) Spectrohéliogramme $H\alpha$ (Meudon), et positions des sources radio (NRH) observées pendant une éruption associée avec une CME. Le cadre bleu indique la taille du complexe actif impliqué et de la région d'extrapolation potentielle, dont les résultats sont superposés à côté sur une image en rayons X (Yohkoh/SXT). Le flare est localisé dans la région active près de la source A. (b) Visualisation de la CME de grande extension angulaire (SoHO/LASCO/C2) correspondante, superposée aux sources radio distribuées dans tout le complexe actif. (c) Lignes de champ extrapolées superposées au magnétogramme longitudinal photosphérique (SoHO/MDI) et aux positions des sources radio. Les lignes colorées passent au voisinage de points neutres $B=0$, certains étant situés très loin du flare. (d) Vue de la configuration magnétique en



projection (Maia et al, 2003).

III. Chauffage de la couronne et formation du vent solaire

Malgré les nombreux efforts théoriques et les résultats observationnels de tout premier plan, notamment de SOHO, les problèmes de chauffage de la couronne et d'accélération du vent solaire restent d'actualité. D'un point de vue strictement théorique, plusieurs types de mécanismes sont susceptibles de fournir l'énergie nécessaire à contrebalancer le flux de chaleur qui doit s'écouler naturellement de la basse couronne vers la chromosphère. L'énergie pourrait provenir des mouvements convectifs photosphériques et avoir pour vecteur le champ magnétique. Cette énergie pourrait également directement provenir de la reconnexion magnétique et être injectée dans le plasma via des processus qui demeurent, sinon inexpliqués, du moins encore inobservés. Une autre possibilité serait que la thermodynamique locale de l'atmosphère solaire soit assez mal maîtrisée et que des mécanismes cinétiques du type « filtrage des vitesses » (Scudder, 1992) soient rendus possibles par le faible degré de collisionnalité de la zone de transition et de la couronne.

En tout cas, quel(s) que soi(ent)t le(s) processus à l'origine du chauffage coronal, une chose est sûre : l'injection de l'énergie vers le plasma s'effectue à très petites échelles. D'un point de vue théorique, les modèles de formation de ces petites échelles ne manquent pas. Par contre, ce sont les contraintes observationnelles fortes sur ces modèles qui font défaut, essentiellement parce que les échelles en question sont largement hors de portée des moyens d'observation à distance.

A. Processus de chauffage de la couronne : la quête des petites échelles

La génération des petites échelles d'injection du chauffage se fait probablement *via* des processus physiques fortement non-linéaires qui nécessitent, en particulier, dans leurs modélisations une approche numérique avec des mailles les plus petites possibles pour que les nombres de Reynolds ne soient pas trop éloignés des valeurs qui sont estimées dans le milieu.

Le rôle de l'intermittence spatiale dans l'aspect temporellement sporadique du chauffage a été étudié grâce à des simulations MHD-2D (Sorriso-Valvo et al., 2002). Dans ces simulations, il a été observé que les annulations de flux entre les contributions positives et négatives du champ magnétique (vorticité, courant ...) sont inhibées pour des échelles plus petites que l'échelle de Taylor et s'arrêtent près de l'échelle dissipative.

Les ondes d'Alfvén, qui ont par exemple la propriété de se dissiper plus lentement que les ondes magnéto-sonores et donc de se propager sur de plus grandes distances, pourraient également jouer un rôle important dans la formation des petites échelles de dissipation. Afin de développer une modélisation mieux adaptée à la couronne et au vent solaire, où les collisions sont négligeables, des critères de filamentation d'ondes d'Alfvén au moyen d'une analyse asymptotique dans la limite des grandes longueurs d'ondes, directement à partir des équations de Vlasov-Maxwell, ont été obtenus (Passot and Sulem, 2003). Cette étude a conduit à la dérivation de modèles fluides permettant la prise en compte de l'effet Landau ainsi que des corrections de type rayon de Larmor fini. Ce type de modèles, dits gyrofluides, a fait l'objet de nombreuses études dans le cadre des plasmas de fusion ou il a fourni une alternative simplifiée aux descriptions gyrocinétiques.

En ce qui concerne les modèles de chauffage par reconnexion magnétique, le plus populaire actuellement est celui des nano-éruptions de Parker : leur rôle peut être ou non prédominant selon que l'indice spectral α du spectre d'énergie des éruptions solaires (pour une loi de puissance en $P(E)=E^{-\alpha}$, où E est l'énergie des événements) est inférieur ou supérieur à 2. L'analyse des données SOHO permet d'établir des lois de puissance aussi fiables que possible et d'étudier la relation entre ces lois spectrales et les modèles théoriques. Plusieurs questions ont été étudiées : (i) propriétés des différents modèles numériques de chauffage ; étude paramétrique, « shell model », modèle d'automate cellulaire décrivant la dynamique du plasma dans le plan perpendiculaire au champ magnétique moyen et propagation par des ondes d'Alfvén le long de ce champ ; la distribution d'énergie apparaît indépendante du forçage photosphérique (Buchlin et al., 2003) ; (ii) lien entre observations coronales et données produites par les modèles numériques, à l'aide d'un modèle de conduction - radiation qui permet par exemple de comprendre dans quelle mesure ces phénomènes de refroidissement modifient les observables (Parenti et al., 2004) ; (iii) développement d'un code numérique spectral 1-D Lagrangien devant être appliqué ensuite à un modèle MHD 1.5D ; (iv) sensibilité des distributions statistiques à la définition des « événements » (Buchlin et al., 2005), (v) étude de la turbulence MHD anisotrope et de la « MHD électronique » (Galtier & Bhattacharjee, 2003). Dans les boucles coronales solaires en effet, comme dans beaucoup d'autres milieux astrophysiques, y compris le vent solaire, les fluctuations magnétiques sont beaucoup plus faibles que le champ moyen. Ce dernier introduit donc une direction d'anisotropie qui modifie de façon importante les possibilités de couplages non linéaires et de cascades, modifiant en conséquence les lois de puissance caractérisant la turbulence. Cette question à caractère fondamental pour les plasmas turbulents anisotropes a été étudiée par Galtier & Bhattacharjee (2003).

Pour finir, Démoulin et al (2003) et Van-Driel et al (2003) ont étudié le chauffage coronal à partir des deux instruments SXT et BCS sur Yohkoh, montrant l'évolution à long terme d'une région active depuis sa naissance à sa dispersion. Ces auteurs ont déduit des observations une dépendance étroite entre la température, la densité du plasma et le champ magnétique. Ces résultats, associés à la théorie énergétique des boucles coronales, leur ont permis de déduire quatre estimations différentes du chauffage coronal ainsi que la dépendance de ce dernier en fonction du champ magnétique.

B. Chauffage de la couronne : et si la thermodynamique était à revoir ?

Dans la couronne solaire le libre parcours moyen λ pour une particule thermique (électrons ou protons) est de l'ordre de 10^{-2} à 10^{-4} fois l'échelle typique de variation H des quantités macroscopiques comme la densité ou la température. De plus, le libre parcours moyen des particules n'est pas, contrairement au cas d'un gaz neutre, constant avec la vitesse des particules mais varie comme le carré de l'énergie. Malgré une valeur si faible du rapport λ/H , un nombre de plus en plus croissant d'auteurs sont devenus convaincus que le flux de chaleur dans un tel plasma ne peut pas être décrit d'une manière satisfaisante par des théories qui supposent que les fonctions de distribution de vitesse de particules sont proches d'une Maxwellienne localement. Landi & Pantellini (2001) ont étudié cette question par des simulations cinétiques en supposant que les fonctions de distribution non thermiques sont présentes à la base de la couronne. En particulier, ils ont prouvé que si l'on suppose que les fonctions de distribution électronique à la base de la couronne ont des queues suprathermiques en loi de puissance suffisamment importantes, alors le

flux de chaleur peut s'écouler vers le haut, c'est à dire dans la direction de la température croissante. En utilisant des Lorentziennes généralisées (ou fonctions Kappa) comme prototypes pour les distributions non thermiques à la base de la couronne, Landi & Pantellini constatent que la conduction de la chaleur peut être correctement décrite par la théorie classique de Spitzer et Härm (1953) pour peu que l'indice de décroissance des distributions en fonction de la vitesse ne dépasse pas une certaine valeur critique. En outre Landi & Pantellini montrent que, à moins que des queues extrêmement fortes soient présentes à la base de la couronne, un mécanisme local de chauffage (par exemple sous forme d'ondes) est nécessaire pour soutenir le gradient de la température entre la base de la couronne et le maximum coronal de la température.

C. Formation du vent solaire : le rôle des ondes d'Alfvén

Les modèles qui visent à étudier les effets des ondes d'Alfvén dans la formation du vent solaire utilisent tous habituellement l'approximation dite de pression d'ondes, approche qui ne permet pas de décrire les couplages non-linéaires entre ces ondes. Dans le souci de remédier à ce problème, Grappin et al. (2002) ont simulé en détail l'injection directe d'ondes d'Alfvén dans la couronne et leurs conséquences sur le vent solaire. Ces ondes sont injectées aussi bien dans les régions équatoriales que polaires. Le résultat est que, non seulement le vent à haute latitude, mais aussi le vent équatorial est accéléré par les ondes d'Alfvén. En effet, alors que dans un modèle standard à pression d'ondes l'épaisseur du vent lent équatorial reste substantielle, dans le modèle plus réaliste de Grappin et al. (2002), la convergence des ondes vers l'équateur est rapidement assez forte pour ne laisser subsister que du vent rapide à toutes les latitudes. Dès que la couche lente est suffisamment mince, toute la couche de courant héliosphérique devient instable avec l'apparition de siphons, c'est-à-dire d'écoulements ordonnés non oscillants le long des boucles fermées équatoriales.

D. Formation du vent solaire : l'apport des modèles cinétiques

De l'ordre de 10^{-2} à 10^{-4} dans la couronne solaire, le rapport λ/H entre le libre parcours moyen des particules et l'échelle typique de variation des quantités macroscopiques devient de l'ordre de l'unité dans la haute couronne et le vent solaire. Le vent solaire est donc un milieu semi-collisionnel où l'on peut s'attendre, tout comme dans la couronne, à observer des fonctions de distribution des vitesses hors d'équilibre thermodynamique, c'est à dire non-Maxwelliennes. C'est ce qui est effectivement observé (Maksimovic et al, 2005).

Depuis plusieurs années maintenant, une approche, dite exosphérique, est développée pour modéliser la formation du vent solaire. Dans cette approche, les collisions entre particules sont négligées et le mouvement de ces dernières obéit aux lois de conservation de l'énergie, de la quantité de mouvement et du moment magnétique. Récemment, Zouganelis et al. (2003 et 2004) ont effectué une modélisation cinétique d'un milieu hors équilibre thermodynamique qui permet (i) de reproduire pour la première des profils de vitesse transsoniques dans la modélisation exosphérique, (ii) de reproduire un vent rapide sans faire appel à un apport ad-hoc d'énergie. Ces résultats viennent d'être confirmés par des simulations cinétiques indépendantes qui tiennent compte des collisions Coulombiennes entre les particules (Landi & Pantellini, 2003 ; Zouganelis et al., 2005). Ce travail a également permis d'unifier des approches théoriques précédentes qui étaient valables uniquement dans des cas de conditions initiales particulières. Cette généralisation permet d'inclure des cas autres que le vent solaire par exemple des vents stellaires de type solaire

où la couronne de l'étoile « exploserait » et le vent serait supersonique dès son départ. Les résultats de la généralisation de Zouganelis et al., (2005) sont présentés sur la Figure III.1, où la vitesse terminale normalisée à la vitesse thermique des électrons à la base du vent est tracée en fonction du rapport des énergies thermique et gravitationnelle, pour différents modèles exosphériques et collisionnels.

E. Mesures coronographiques de la turbulence dans la couronne interne:

En vue de mieux préciser les paramètres instrumentaux les plus importants d'une expérience de magnétographie coronale, une étude approfondie de la variation du profil de la raie verte du Fe XIV en fonction de la latitude et de la distance radiale dans la couronne d'avril 2002 a été menée par Contesse et al. (2004). Ces nouvelles observations CCD ont été effectuées sur le grand coronographe classique de Lyot de l'Observatoire de NSO/ Sacramento Peak. L'un des résultats principaux de ce travail est qu'il n'y a pas de variation significative de la turbulence dans la couronne équatoriale et qu'il y a croissance de la macro-turbulence dès la couronne interne au pôle au voisinage du trou coronal. La qualité des mesures utilisées par Contesse et al (2004) est suffisante pour que le profil détaillé soit analysé avec un excellent rapport signal/bruit et montre des décalages Doppler nets sur le centre de gravité de la raie. Il s'agit évidemment des effets produits par l'intégration le long de la ligne de visée de plusieurs structures superposées. Ces décalages sont rapidement variables (cadence des mesures de 4 s.) montrant des pseudo-oscillations rapides qui pourraient correspondre à la propagation d'ondes magnéto-acoustiques qui ont pour origine la haute chromosphère. Ces ondes semblent d'ailleurs détectables sur les meilleures séquences temporelles à haute résolution obtenues dans l'espace (TRACE).

F. Formation du vent solaire : l'écoulement dans les trous coronaux polaires.

La méthode de "Doppler dimming", développée par l'équipe de SOHO/UVCS permet de déterminer la vitesse d'écoulement, perpendiculaire à la ligne de visée et au-delà du bord solaire, en exploitant les mesures du rapport de deux raies du multiplet d'oxygène VI à 1032 et 1038 Å. Utilisée par l'équipe UVCS entre 1.5 et 4 Rs, cette méthode a permis de déterminer une plage de vitesse autour de 100 km/s. Toutefois, les limitations sont importantes loin de cette vitesse, à cause d'une sensibilité forte à la densité électronique qui est difficile à déterminer avec une précision nécessaire.

En vue d'obtenir des résultats plus précis Gabriel et al. (2003) ont raffiné la théorie du « Doppler dimming » ce qui leur a permis de dériver le rapport d'intensité du multiplet d'oxygène en fonction de la vitesse du flux, de la densité électronique et d'autres effets géométriques et de physique atomique. En particulier, ils ont introduit l'effet de "limb brightening" de la source d'illumination venant du Soleil, ce qui modifie considérablement les résultats. Avec cette nouvelle technique, Gabriel et al. (2003) ont étudié les « plumes » dans les trous coronaux polaires. Les résultats qu'ils obtiennent sont montrés sur la Figure III.2a. Contrairement à ce qui a été "supposé" pas plusieurs auteurs, Gabriel et al. (2003) trouvent que les « plumes » dans cette région sont plus rapides que les régions « interplumes ». Une extension de ce travail a été effectuée récemment, en collaboration avec les experts d'UVCS à Turin et les résultats sont montrés sur la Figure III.2b. Les « plumes », initialement plus rapides que l'inter-plume, sont moins accélérées et sont doublées par les régions « inter-plumes » au-delà de 1.5 Rs.

Une autre conclusion du travail de Gabriel et al. (2003) est que la matière de la « plume » occupe la plupart de la ligne de visée. C'est-à-dire que les « plumes » ne sont pas simplement cylindriques, mais ont la forme soit d'une nappe ou d'un rideau, soit une superposition de plusieurs cylindres dans la ligne de visée.

G. Flux de masse du vent solaire à trois dimensions.

Toute contrainte sur les flux de vent solaire des différents types (lent, rapide, CME) peut aider à la compréhension des mécanismes d'expansion. L'analyse des résultats de l'expérience SWAN sur SOHO a fourni les taux d'ionisation 3D de l'hydrogène interstellaire depuis 1996 (Quémerais et al., 2005). Ces taux sont convertibles en flux de masse de vent solaire en fonction du temps et de la latitude. Ce type d'études devrait permettre de déterminer si oui ou non le vent rapide (respectivement lent) est associé à un flux bien déterminé et ce quelle que soit la latitude. L'objectif final est de calculer le budget global de perte de masse, en tenant compte de toutes les latitudes et de la phase du cycle solaire, ainsi que de calculer la pression dynamique du vent à 3 dimensions, qui influe elle sur la forme de l'héliosphère.

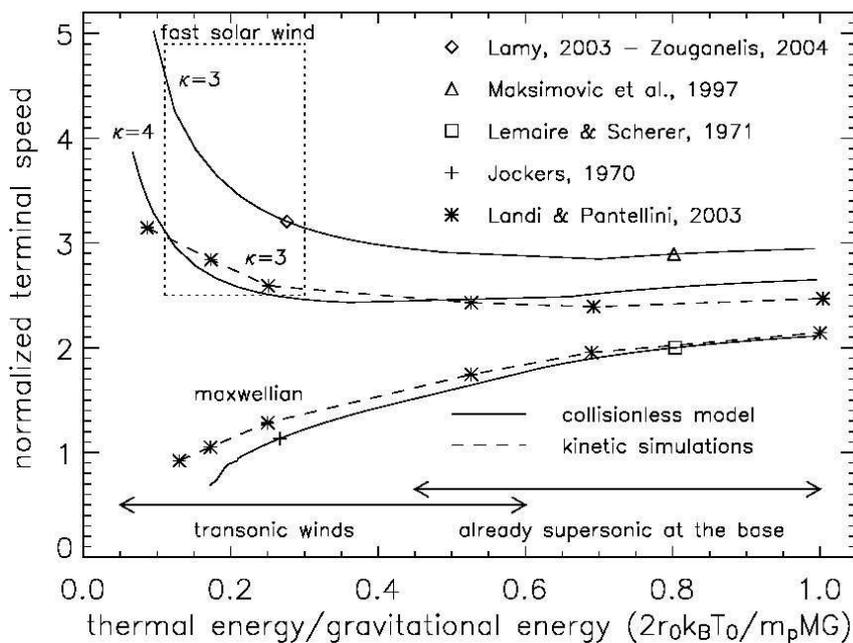


Figure III.1: Vitesse terminale normalisée à la vitesse thermique des électrons à la base du vent à partir d'un modèle exosphérique (cinétique sans collision) et de simulations cinétiques avec collisions en fonction du rapport des énergies thermique et gravitationnelle (Zouganelis et al., ApJL, 2005).

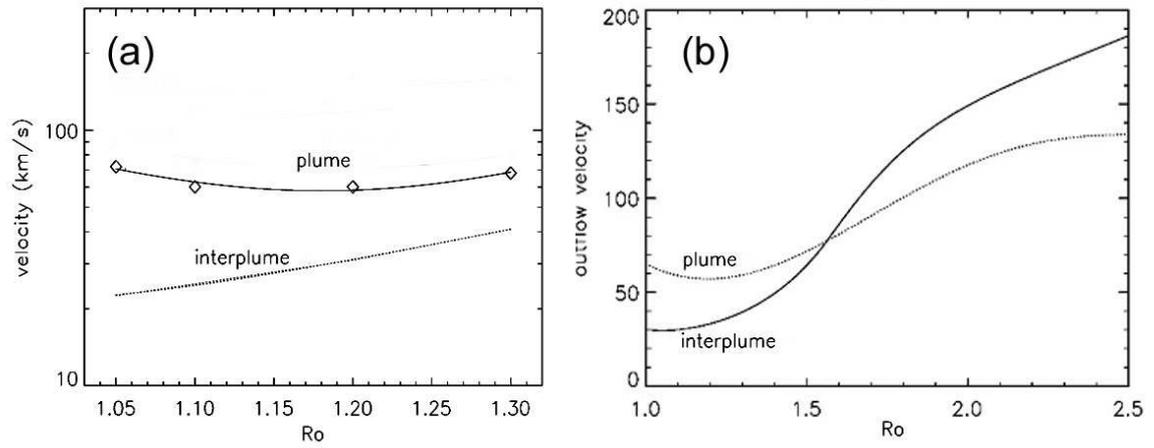


Figure III.2 : Vitesse d'écoulement du plasma dans les régions « plumes » et « inter-plumes » des trous coronaux polaires (Gabriel et al, 2003 et en préparation)

IV. Interaction du vent solaire avec la magnétosphère, l'ionosphère et la thermosphère terrestres

La magnétopause, frontière de la magnétosphère avec le milieu interplanétaire, n'est pas étanche et des échanges de masse, d'impulsion, d'énergie se produisent entre le vent solaire et le plasma magnétosphérique. Les plasmas de l'ionosphère et de la magnétosphère sont étroitement couplés par l'intermédiaire des lignes de force du champ magnétique terrestre qui assurent la circulation des courants, la transmission des champs électriques entre les deux régions. Des milieux denses comme le plasma ionosphérique et le fluide neutre de la thermosphère sont couplés par collisions. Ces exemples d'interactions, certes simplifiées, montrent que l'étude d'une région ou d'un processus dans l'environnement terrestre doit prendre en compte des éléments extérieurs, des constantes de temps différentes,

La diversité des instruments, au sol et à bord de satellite, et leur coordination permet maintenant de mieux appréhender ces systèmes couplés. Les résultats et l'expertise obtenus par la communauté française dans le cadre des études comparatives sol-INTERBALL entreprises depuis plusieurs années ont permis d'aborder la coordination sol-CLUSTER dans de bonnes conditions. Les années 2002 et 2003 ont vu le fruit de ce travail, en particulier en ce qui concerne l'étude du cornet polaire.

L'utilisation de modèles physiques permet elle aussi de faire le lien entre des instruments dispersés, entre des échelles différentes. Le modèle TRANSCAR de transport ionosphérique le long des lignes de champ magnétique a évolué vers un modèle pseudo 3D, modèle qui par ailleurs a été porté dans les atmosphères de Mars et Titan. La modélisation de l'interaction des plasmas avec la haute atmosphère neutre a également progressé dans le cadre d'une collaboration avec le NCAR (Boulder-Colorado). Elle a permis de quantifier l'effet de rétroaction des vents neutres sur le transport du plasma dans l'ionosphère et par couplage dans la magnétosphère.

Enfin, une coopération avec les physiciens solaires a démarré en 2003 et 2004 pour étudier les effets sur l'environnement terrestre des événements solaires.

A. L'interaction du vent solaire avec les régions polaires de la magnétosphère et de l'ionosphère

Le cornet polaire est une région magnétosphérique de faibles dimensions mais essentielle quant aux échanges de plasma, d'impulsion et d'énergie entre le vent solaire et les plasmas à l'intérieur de la magnétosphère. En effet, les lignes de force du cornet polaire, issues de l'ionosphère polaire diurne, atteignent la magnétopause diurne à haute latitude où elles peuvent se reconnecter aux lignes de force du milieu interplanétaire et initier les échanges entre les deux milieux. Le plasma du cornet polaire est donc extrêmement sensible aux variations du milieu interplanétaire (champ magnétique interplanétaire, pression du vent solaire) et répercute ses modifications à l'ensemble du système couplé magnétosphère-ionosphère. L'étude de la réponse dynamique de ce système couplé aux stimuli du vent solaire représente une thématique importante qui a donné lieu à de nombreux travaux et à trois thèses [Pitout, 2003; Vontrat-Reberac, 2003 ; Marchaudon 2003].

Elle a pu être menée à bien grâce à la conjonction d'observations à différentes altitudes dans le cornet polaire, principalement les satellites CLUSTER, à haute altitude au niveau de la magnétopause ou à des altitudes intermédiaires suivant l'orbite, et les sondages aux altitudes ionosphériques au pied des lignes de force du cornet polaire par les radars EISCAT-ESR et Superdarn.

Des événements transitoires d'entrée de plasma d'origine solaire le long des lignes de champ du cornet polaire sont observés par CLUSTER et interprétés comme la signature d'une reconnexion impulsive se produisant à la magnétopause. Leur analyse détaillée a permis de quantifier le rôle de :

- l'orientation du champ magnétique interplanétaire. D'une part, elle détermine la localisation des sites de reconnexion au nez de la magnétopause ou sur les flancs. D'autre part, ses variations induisent une réponse dynamique immédiate des plasmas à toutes les altitudes dans le cornet polaire. En effet, grâce aux observations à 4 satellites de CLUSTER à haute altitude, on a pu estimer la vitesse des structures d'injection de plasma solaire causée par des rotations du champ magnétique interplanétaire. Au pied de la ligne de champ passant par CLUSTER, le transport du plasma ionosphérique, simultanément observé par les radars SuperDARN, présente des sursauts de vitesses. On a trouvé un bon accord en direction et en amplitude entre ces sursauts du transport ionosphérique et les vitesses des structures d'injection déduite de CLUSTER à haute altitude comme le montre la figure IV.1 (Vontrat-Réberac et al., 2003 ; Marchaudon et al., 2004a).
- des impulsions de pression du vent solaire. La corrélation « un pour un » de la plupart des événements transitoires d'injection de plasma solaire avec des impulsions de la pression du vent solaire montre que ce sont des éléments importants dans le déclenchement de la reconnexion. Dans l'ionosphère, les sursauts de transport observés par Superdarn ont une signature plus diffuse qu'en l'absence d'impulsions de pression. Le tube de flux reconnecté continue à exister plusieurs minutes après la reconnexion ; il est transporté dans la direction anti-solaire au-dessus de la calotte polaire avant d'être assimilé au plasma ambiant (Bosqued et al., 2005 ; Cerisier et al., 2005). Par ailleurs, l'estimation de la distribution des courants alignés d'un tube de flux récemment reconnecté grâce à des observations conjugués des radars Superdarn avec le satellite Oersted à basse altitude a confirmé la distribution théorique attendue (Marchaudon et al., 2004b).

Non seulement la magnétopause réagit dynamiquement aux fluctuations du milieu interplanétaire, mais de plus elle est le siège d'oscillations de surface engendrées par le cisaillement de vitesses entre le vent solaire supersonique et le plasma magnétosphérique subsonique. Ces oscillations sont responsables de la résonance des lignes de champs magnétiques à l'intérieur de la magnétosphère. Le modèle numérique TRANSCAR de transport du plasma le long des lignes de champ magnétique a montré que ce phénomène de résonance pouvait expliquer les augmentations périodiques de températures électroniques et ioniques observées dans l'ionosphère polaire diurne par le radar EISCAT-ESR. Le chauffage de ces deux populations serait respectivement causé par la présence de courants alignés portés par les ondes d'Alfvén dans la région de résonance et de champs électriques [Pitout et al., 2003].

Etant donné l'importance du transport horizontal dans l'ionosphère des hautes latitudes sondée par les radars EISCAT, ESR et Superdarn (cornet polaire, calotte polaire, zone aurorale), le modèle ionosphérique TRANSCAR a été étendu pour inclure les effets de ce transport sur le plasma ionosphérique. Il s'agit pour l'instant d'un code « pseudo 3D » car il doit être associé à un

modèle de convection statistique, empirique ou théorique. Ce nouveau code est capable de reproduire quantitativement les observations EISCAT (voir figure IV.2) lors de périodes agitées lorsqu'il est couplé à une description des entrées d'énergie aurorale (précipitations électroniques, flux de chaleur) et du transport horizontal issu d'une procédure d'analyse de données développée au NCAR (Blelly et al., 2005). La réaction de l'ionosphère polaire aux conditions observées dans le cornet polaire (précipitations d'électrons de basses énergies d'origine solaire et sursauts de vitesses) a été simulée. Ainsi il a été démontré que la morphologie observée de la structure ionosphérique polaire - antiphase entre la concentration électronique et la température électronique - ne résultait pas forcément de l'effet direct d'une source de précipitation de basse énergie, mais pouvait provenir de l'action d'une source éteinte depuis un certain temps (jusqu'à une vingtaine de minutes) et dont l'action perdure à cause de l'effet retard, maintenant une température électronique élevée. [Pitout et Blelly, 2003].

Ces études montrent que les observations ESR sont extrêmement complexes à analyser et nécessitent un outil du type TRANSCAR, pour intégrer l'historique des tubes de champ. Cet outil peut également permettre d'étendre la notion de conjonction entre Cluster et les instruments sols, dès lors que l'information sur la convection est disponible

B. Les arcs auroraux et autres phénomènes dynamiques nocturnes

Les arcs auroraux, créés par la collision de particules magnétosphériques avec la haute atmosphère terrestre, s'accompagnent de la production d'ionisation dans l'ionosphère et par suite de la modification locale des propriétés électriques de l'ionosphère. Les arcs sont en fait les manifestations visibles de couplages entre la magnétosphère, l'ionosphère et l'atmosphère tels que l'échange, la création ou la perte de particules, la circulation de courants, la transmission de champs électriques... Grâce à la conjonction de diverses observations dans l'ionosphère (EISCAT, Superdarn, caméras), et la magnétosphère comme CLUSTER et des satellites à plus basse altitude (FAST, OERSTED), l'étude de la circulation des courants au voisinage des arcs a pu progresser sur plusieurs points :

- la structure et la dynamique du circuit de courants qui s'établit entre l'ionosphère et la magnétosphère le long des lignes de force connectées aux arcs et aux bords des arcs. Dans le cadre d'une conjonction entre EISCAT et CLUSTER avec des caméras au sol, on a pu montrer que les courants de retour au bord des arcs prenaient naissance dans une cavité ionosphérique [Aiko et al. 2004].
- l'électrodynamique des arcs. Pour cela, on a exploité les mesures de champ électriques ionosphériques par les radars SuperDARN et les mesures simultanées de courants alignés le long des lignes de champ magnétique par les satellites FAST et OERSTED au-dessus du champ de vue de Superdarn. La modélisation a permis de déduire tous les paramètres électrodynamiques de l'arc (champs électriques, conductivités, courants ionosphériques) et d'en suivre la dynamique pendant 20 minutes (Marchaudon et al., 2004c). Par ailleurs, ces mesures ont permis de mettre en évidence des structures de champs électriques très localisées en forme de vortex (Seran et Cerisier, 2005) ou de brusques accélérations (1.7 km/s) du plasma ionosphérique en période calme (Senior et al., 2002).

La compréhension de l'électrodynamique des arcs auroraux a été abordée sur le plan de la simulation en couplant le modèle TRANSCAR au code d'électrodynamique locale développé J.P. St Maurice et Jean-Marc Noël (Canada). En effet, en présence de structures de faibles étendues

spatiales, les transports horizontaux peuvent être exacerbés si les gradients de conductivités sont élevés, ce qui est le cas sur le bord des arcs. Dans les équations de conservation de la matière, ce mouvement horizontal affecte la concentration et peut conduire soit à une réduction du gradient, soit à un raidissement de celui-ci, et les conséquences pour les critères de déclenchement des instabilités plasmas peuvent alors être sensiblement affectées. En particulier, l'influence du chauffage des électrons thermiques dû à une instabilité de type Farley-Buneman qui se développe en région E en présence de forts champs électriques a été étudiée. Des courants d'amplitude $650 \mu\text{A m}^{-2}$ sont ainsi obtenus sur la frontière de la structure qui impose une forte variabilité du champ électrique au voisinage du gradient de conductivité (phénomène observé avec le sondeur EISCAT).

Les électrons thermiques accélérés à basse altitude, tel que le modèle ci-dessus le prédit, subissent des collisions dont l'importance est décroissante en fonction de la vitesse des électrons. Ainsi la queue de la distribution électronique évolue dans un milieu quasi non collisionnel et il est possible de cette manière de créer une population supra thermique à plus haute altitude (voir figure IV.3). Ce travail qui a débuté en 2004 lors d'un séjour de J-P St Maurice en France, fait l'objet de la thèse de Géraldine Garcia co-encadrée par François Forme. La dynamique des électrons est simulée par un code Monte-Carlo dont l'opérateur de collision est calculé à partir de l'équation de Fokker-Planck.

C. Interaction avec l'atmosphère neutre :

En zone aurorale et polaire, la circulation neutre thermosphérique est entraînée par la convection ionosphérique : cela a été démontré dès la fin des années 80, en particulier grâce aux observations du satellite DE-2, pour les altitudes de la région F. L'interféromètre EPIS, installé à Svalbard en début d'automne 2002, était l'un des très rares instruments optiques opérationnels lors des événements solaires exceptionnels de fin Octobre 2003. Une intensification du vent thermosphérique a été observée en réponse à l'éjection de masse coronale du 28 Octobre. Cette intensification, en excellent accord avec les mesures ESR, a été modélisée avec CTIPe, modèle 3D physique (Thermosphère-Ionosphère-Plasmasphère-Electrodynamique) développé à l'Université du Colorado (Thuillier et al., 2005).

Mais jusqu'à quelle profondeur dans l'atmosphère neutre, l'entraînement ionique est-il efficace ? Les données de vent neutre obtenues avec l'interféromètre WINDII à bord du satellite UARS ont permis de répondre à cette question. Une étude statistique de la réponse du vent neutre au champ magnétique interplanétaire fait apparaître une réponse clairement identifiée jusqu'à des altitudes aussi basses que 105 km avec une échelle de temps de quelques heures (Richmond et al., 2003a). Les modifications de la circulation thermosphérique et le chauffage Joule ont pour effet des modifications de la structure thermique de la thermosphère, de la composition neutre et ionosphérique et aussi des émissions de l'oxygène atomique. Les études réalisées dans ce domaine sont explicitées dans la partie du rapport sur la Météorologie de l'Espace, car elles ont des implications à la fois sur la prédiction de l'orbitographie et sur les télécommunications.

La thermosphère à son tour, entraîne avec elle au cours de son mouvement le milieu ionosphérique à travers le champ magnétique terrestre produisant par effet dynamo un champ électrique supplémentaire dans le milieu ionosphérique. L'influence de la thermosphère sur le transport du plasma magnétosphérique a été étudiée grâce au couplage du modèle numérique IMM (Ionosphere Magnetosphere Model) du CESR avec le modèle de circulation générale TIEGCM du NCAR qui décrit la dynamique tridimensionnelle de l'ionosphère et de la

thermosphère terrestre. Le modèle couplé appelé Magnetosphere-Thermosphere-Ionosphere Electrodynamics General Circulation Model a permis de quantifier pour la première fois de manière autocohérente l'effet des vents neutres thermosphériques (responsables de la dynamo ionosphérique) sur la dynamique des plasmas ionosphériques. Deux types de simulation ont été réalisés pour évaluer, d'une part l'influence de ces vents sur le champ électrique auroral, et d'autre part leur influence sur le champ électrique équatorial. Lorsqu'on étudie l'influence des vents neutres au cours d'une période d'activité soutenue, le MTIEGCM montre que les vents neutres modifient le champ électrique ionosphérique auroral de 10% environ et diminue la pression du plasma magnétosphérique de 20% environ l'empêchant de s'approcher trop près de la Terre (Peymirat et al., 2002). Le deuxième type de simulation permet de quantifier l'effet des vents fossiles. Les vents neutres thermosphériques de grande amplitude générés lors d'un sous-orage magnétique, persistent en raison de leur inertie à la fin du sous-orage et créent par effet dynamo un champ électrique équatorial de forte amplitude (Richmond et al., 2003b).

D. Effet des événements solaires sur l'environnement terrestre

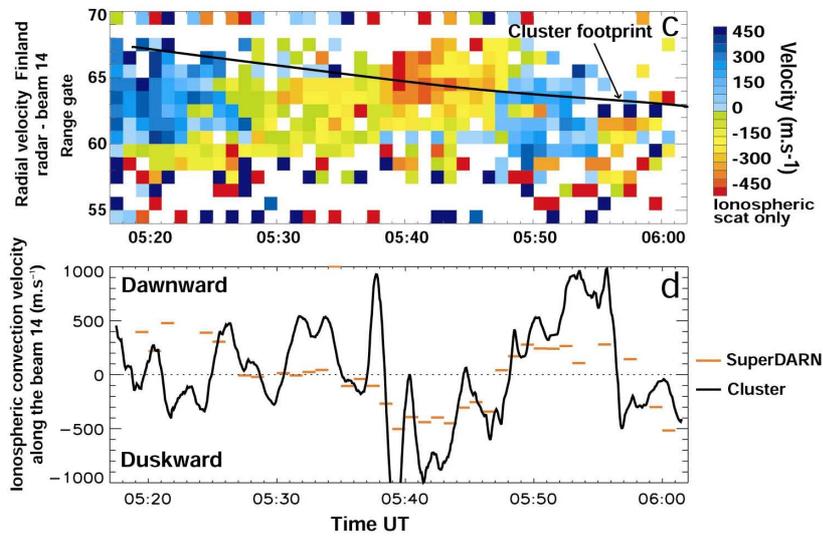
Lors d'une campagne de mesures coordonnées avec SOHO (campagne MEDOC de mai 2003) s'est produit le second plus gros orage magnétique de l'année (période du 29-30 mai). L'ensemble des données acquises a permis d'étudier la chronologie et les mécanismes de transmission des diverses perturbations engendrées par des éruptions solaires et les éjections de masse coronales associées : chocs interplanétaires, compression de la magnétosphère, convection et courants ionosphériques jusqu'à l'effet pour les orbites de satellites basse altitude et les mesures GPS (voir aussi la partie du rapport météorologie de l'Espace) (Hanuise et al, 2005).

E. Turbulence et physique de la mesure radar

Des résultats antérieurs sur la turbulence acoustique ionique, observée par EISCAT/ESR au bord des arcs auroraux, montrent qu'elle ne peut être créée que par des faisceaux d'électrons, de très basse énergie (10-50 eV) remontant de l'ionosphère. Au cours des années 2003 et 2004, les effets cinétiques des ondes sur les électrons du faisceau et du corps de la distribution ont été inclus dans le code. L'effet de la diffusion des électrons du faisceau contribue à notablement modifier les échelles de temps caractéristiques de l'instabilité. Les effets cinétiques sur le corps de la distribution contribuent quant à eux à chauffer le plasma. La prise en compte de ce phénomène a permis de comparer des spectres simulés avec des spectres mesurés et ainsi de définir des échelles de temps caractéristique du phénomène. La turbulence apparaît dans les régions de courant retour sur des échelles spatiales de l'ordre de la centaine de mètre et des temps de l'ordre de 100 ms (Isham et al. 2005).

L'application de la théorie de la diffusion collective au plasma ionosphérique sondé par les radars SuperDARN permet d'accéder aux paramètres de la turbulence, et en particulier à la détermination du coefficient de diffusion. Après une étape de validation par des analyses statistiques, les caractéristiques de la turbulence ont été reliées aux conditions géophysiques de l'ionosphère (phénomène de "vieillesse" du faisceau) en mettant en évidence le rôle prépondérant des irrégularités de moyenne échelle (de l'ordre du km) qui introduisent un effet de décorrélation du front d'onde au cours de sa propagation. Cet effet dépend du rapport entre la fréquence de sondage et la fréquence plasma de l'ionosphère. [Thèse de X. Vallières ; Vallières et

al., 2003, 2004]. Modélisations théoriques et analyses statistiques ont par ailleurs permis d'analyser la signification physique de la largeur spectrale des échos des radars SuperDARN et de montrer qu'elle peut être un excellent identificateur des régions de la magnétosphère auxquelles l'ionosphère sondée par les radars est magnétiquement connectée. [André et al., 2002; Villain et al., 2002 ; André et Dudok de Wit, 2003 ; André et al., 2003].



- **Figure IV.1** : Vitesses de convection mesurées par SuperDARN et Cluster-1 le 17 Mars 2001. Le panneau du bas compare les vitesses de convection mesurées par Cluster (ligne noire) et par SuperDARN (segments rouges). La vitesse mesurée par Cluster-CIS a été projetée le long du faisceau 14 du radar d'Hankasalmi. La vitesse SuperDARN est la vitesse radiale (représentée sur le panneau du haut) mesurée au pied de la ligne de champ de Cluster (ligne noire). (Vontrat-Réberac et al., 2003 ; Marchaudon et al., 2004a).

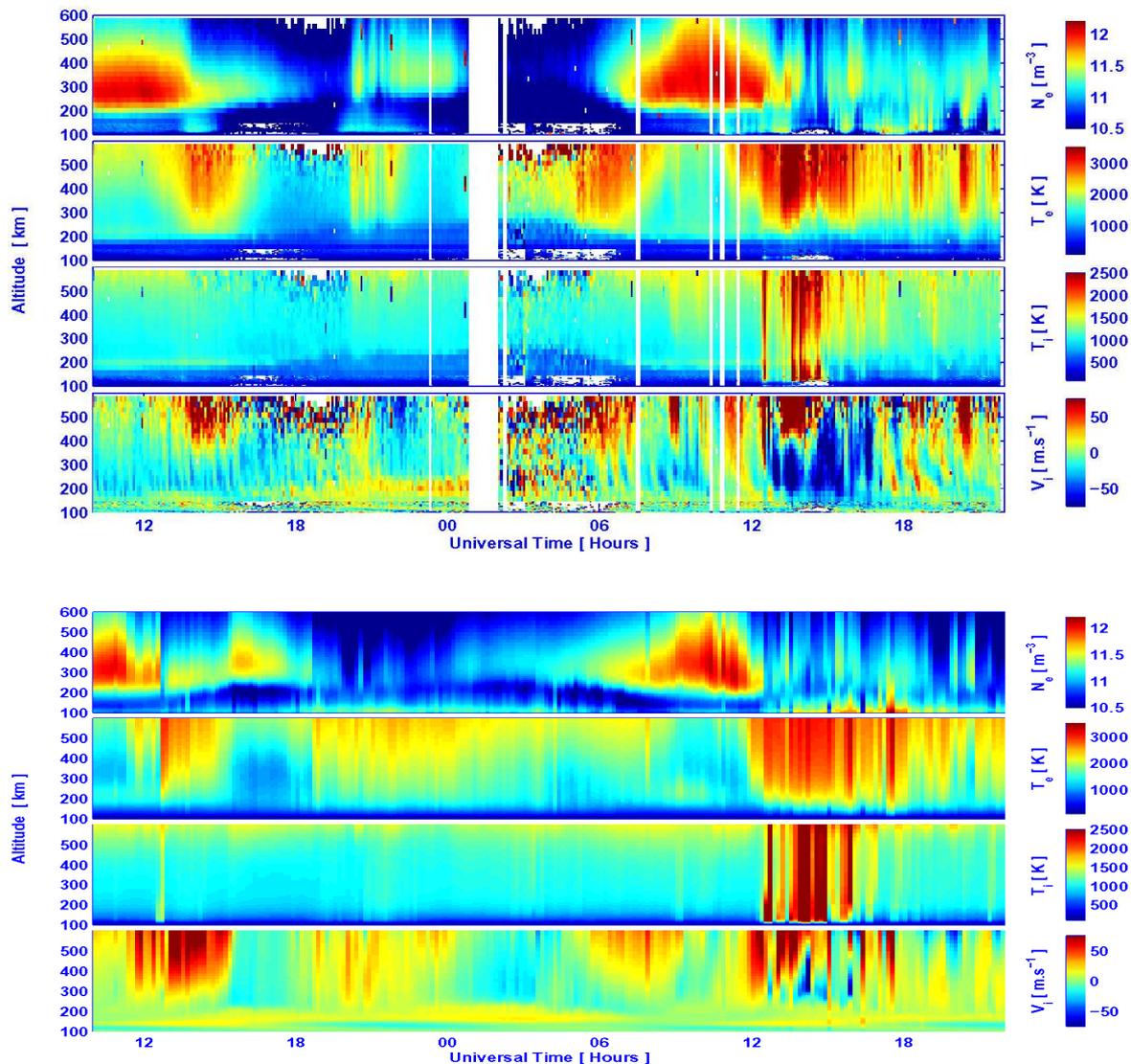


Figure IV.2: Comparaison entre les observations EISCAT (panneau supérieur) du 16 Février 1993, 10 UT au 17 Février 1993, 21 UT et la modélisation TRANSCAR (panneau inférieur). Sont représentées du haut en bas la densité électronique, la température électronique, la température ionique et la vitesse ionique // au champ magnétique. La simulation a été réalisée en utilisant les entrées d'énergie aurorale (précipitations électroniques, flux de chaleur) et la convection issue de l'assimilation de données de 112 stations magnétiques sol, 2 radars ionosphériques et 4 satellites (NOAA et DMSP). Le comportement du plasma ionosphérique est quantitativement très bien modélisé pendant l'orage magnétique du 17 Février après-midi. Les principales différences entre observations et simulations sont dues à des précipitations électroniques de faible énergie non mesurées par les satellites (Blelly et al., 2005).

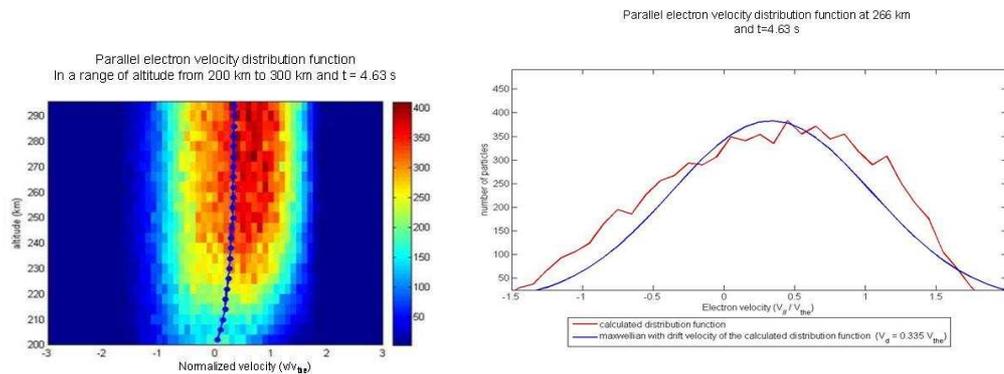


Figure IV.3 : Simulation de la fonction de distribution des vitesses des électrons dans un plasma dont la densité électronique est de 10^{11} m^{-3} , les températures électronique et ionique de 1500K et qui est soumis à un champ électrique parallèle constant de 0.01 mV/m. Le panneau de gauche représente la fonction de distribution des vitesses des électrons pour des altitudes comprises entre 200 et 300km. La courbe bleue montre l'augmentation de la vitesse de dérive en fonction de l'altitude. La courbe rouge du panneau de droite représente une coupe à 266 km d'altitude. La courbe bleue correspond à une maxwellienne analytique ayant la même vitesse de dérive que la fonction calculée.

V. Les processus fondamentaux dans les plasmas du système solaire

A Importance de la turbulence dans les plasmas du système solaire

Les processus fondamentaux à l'œuvre dans les plasmas du système solaire ont un caractère universel qui permet d'extrapoler ce qui est observé dans ces milieux à ce qui se produit dans beaucoup d'autres domaines moins accessibles de l'astrophysique. Même lorsque les échelles sont très différentes, les paramètres sans dimension restent en effet le plus souvent comparables à ceux d'une région ou d'une autre de l'héliosphère. L'accessibilité des plasmas du système solaire et les mesures détaillées qu'on peut y faire, en particulier les mesures in-situ des environnements terrestre et planétaires, sont alors des avantages qu'il convient d'exploiter. Ceci permet de comprendre, non pas des détails fins et ignorables en première approximation comme on le croît trop souvent, mais des effets tout à fait majeurs tels que les processus de chauffage et d'accélération à l'œuvre dans la couronne solaire et à l'origine des aurores polaires. En analysant les différents travaux réalisés dans ce domaine, il s'avère que la turbulence joue un rôle prédominant dans toutes ces études et nous avons donc organisé la présentation de la section qui suit autour de ce thème. Cette importance se comprend simplement quand on sait que les plasmas spatiaux sont souvent sans collision ou faiblement collisionnels : seuls les champs collectifs, via les ondes et la turbulence, sont alors capable de jouer les rôles « non idéaux » qui sont dus, au moins en partie, aux collisions dans les gaz ordinaires : diffusion, viscosité, résistivité, etc... L'importance de ces phénomènes non idéaux est naturellement d'autant plus grande que les échelles sont plus petites, mais on sait que toutes les échelles sont couplées via les phénomènes non linéaires et qu'on ne peut pas ignorer, par exemple, la fine couche limite visqueuse qui entoure l'aile d'un avion pour comprendre ses propriétés de vol.

B Turbulence et chauffage

La question toujours ouverte du chauffage de la couronne solaire a motivé de nombreuses études du lien turbulence/chauffage, mettant en œuvre diverses approches : modélisation MHD, calcul numérique et analyse de données (SOHO). Il est maintenant bien admis que, quel que soit le mécanisme, c'est aux très petites échelles que s'effectue le chauffage coronal et que celles-ci sont très probablement engendrées par des phénomènes non linéaires. Les travaux de la communauté PNST concernant cet aspect spécifique sont décrits dans la partie III du présent rapport « Chauffage de la couronne et formation du vent solaire ».

C Turbulence et dynamo

L'étude de la turbulence MHD incompressible est développée au PNST pour plusieurs applications en raison de son rôle potentiel pour l'accélération du vent solaire et aussi, bien sûr, pour l'effet dynamo dont l'importance en physique solaire n'est pas à démontrer. Les petites échelles étant cruciales pour déterminer cet effet, il est évidemment nécessaire de bien comprendre comment elles sont engendrées par les plus grandes, ce couplage entre échelles étant l'essence même de la turbulence. R. Grappin et J. Léorat, en collaboration avec d'autres spécialistes internationaux, dont W.C. Mueller et D. Biskamp, ont analysé la répartition cinétique/ magnétique de l'énergie turbulente et le rôle de la dimension (2-D ou 3-D) pour la pente des spectres obtenus. Des raisonnements dimensionnels théoriques, avec une fermeture isotrope EDQNM, les avaient menés à conclure à un excès d'énergie magnétique décroissant

en k^{-2} et une énergie totale décroissant en $k^{-3/2}$. Bien que ces résultats aient été confirmés ensuite par des simulations directes 2-D, des simulations plus récentes, 3-D et sans champ moyen, ont produit un comportement différent, avec un déséquilibre beaucoup plus fort et un spectre total en $k^{-5/3}$. Ceci a mené ces auteurs à généraliser les fermetures EDQNM et à déduire une relation unique entre spectre résiduel et spectre total reproduisant bien les comportements dans les deux situations, avec et sans champ moyen (Mueller et al, 2003, Mueller et Grappin, 2005).

J. Léorat a par ailleurs développé en collaboration avec une équipe du CEA une étude expérimentale de l'effet dynamo, avec en particulier l'étude de faisabilité d'une dynamo fluide forcée par précession, une partie de l'instrumentation étant maintenant opérationnelle. Des études théoriques associées à ce programme expérimental sont par ailleurs entreprises pour comprendre les instabilités résonnantes dues à la précession et la saturation non linéaire de l'effet dynamo.

En ce qui concerne le couplage photosphère - couronne - vent solaire, une modélisation a été entreprise, depuis quelques années, de la réponse de la couronne à des perturbations variées du pied des lignes de force, température, ondes d'Alfvén, etc..., ce qui a été rendu possible grâce à un code numérique plus souple que les codes MHD habituels pour les conditions limites. Plusieurs résultats importants s'en dégagent : (i) le vent équatorial, comme le vent de haute latitude, est accéléré par les ondes d'Alfvén ; (ii) dès que la couche lente est suffisamment mince, elle devient instable (Grappin et al, 2002, 2003a, 2003b, 2005). A l'origine de cette instabilité, R. Grappin et ses co-auteurs ont identifié un phénomène de « siphon » correspondant à un déséquilibre de pression et à un écoulement non oscillant le long des boucles fermées. Ce phénomène est engendré par les ondes d'Alfvén via un phénomène d'interférence 2-D qui est permanent pour des ondes d'Alfvén monochromatiques mais qui peut se produire de façon intermittente dans le cas d'un spectre large. Une étude expérimentale de l'évolution des ondes d'Alfvén dans la cavité héliosphérique a par ailleurs été entreprise à partir des données Ulysse. Avec Guillaume Aulanier, l'étude complète d'un pur forçage photosphérique (conditions limites rigides) a également été réalisée récemment, montrant que, dans ces conditions, les boucles magnétiques gonflent progressivement, sans rôle prédominant de la reconnexion. Avec A. Mangeney et P. Hellinger enfin, l'aspect microscopique des choses a été abordé, à l'aide d'un code hybride « comobile » mimant l'expansion du vent solaire (Hellinger et al, 2003a, 2003b). La saturation de l'anisotropie par les instabilités Alfvén cyclotron et miroir a pu être mise clairement en évidence, effet qui ne peut être pris en compte correctement par les codes MHD.

Pour la dynamo tachocline solaire, H. Politano et ses collègues ont construit un modèle MHD simple de la zone convective, qui ne dépend que de deux variables d'espace et permet ainsi d'atteindre des nombres de Reynolds magnétiques élevés (~9000). Pour atteindre les faibles nombres de Prandtl (~0.0007), les petites échelles ont été modélisées avec une technique LES. La génération d'un champ magnétique a été observée dans tous les régimes de paramètres étudiés, le nombre de Reynolds critique augmentant fortement lorsque le nombre de Prandtl passe de 0.5 à 0.3, en lien direct avec l'apparition de la turbulence.

Une conférence « UK MHD » a été organisée par ailleurs par Y Ponty, H Politano et V Pellegrini à Nice les 6-7 mai 2004. Elle a réuni 80 participants parmi les meilleurs spécialistes de la MHD et de la dynamo, dont 30 français.

D Turbulence et reconnexion

La magnétosphère, avec sa frontière extérieure la magnétopause, constitue un obstacle dans l'écoulement du vent solaire. La magnétogaine est la région-tampon qui se situe entre le choc

d'étrave et la magnétopause. Les mesures montrent que le champ magnétique y est très fluctuant et que ces fluctuations ont toutes les propriétés de ce qu'on peut qualifier de turbulence. Comprendre la turbulence dans cette région-clef revêt une importance particulière quand on veut appréhender les processus d'interaction entre le vent solaire et la magnétosphère car, selon les descriptions fluides « idéales » telles que la MHD, la magnétopause devrait être une frontière parfaitement étanche à la pénétration du vent solaire. Au contraire, les ondes de grande échelle qui s'y développent sont capables, par cascade ou par interaction avec le gradient de la magnétopause, d'engendrer des échelles suffisamment petites pour sortir du cadre de ces théories fluides et autoriser les transferts via, par exemple, les phénomènes de reconnexion magnétique.

Des progrès importants ont été réalisés ces dernières années dans le domaine de la turbulence dans les plasmas magnétisés et compressibles. Au plan expérimental, c'est naturellement l'utilisation des données multi-satellites CLUSTER qui a permis les avancées les plus spectaculaires. L'étude expérimentale des propriétés de la turbulence avait toujours été jusqu'ici sujette à l'ambiguïté spatio-temporelle inhérente aux mesures mono-satellites et c'était le but principal de la mission CLUSTER que de lever cette ambiguïté grâce à l'utilisation simultanée des données de quatre satellites proches. Dans la gamme des fréquences dites UBF (Ultra-Basses Fréquences, quelques Hz), la turbulence magnétique a été étudiée par F. Sahraoui, G. Belmont et L. Rezeau en utilisant le magnétomètre alternatif de CLUSTER (STAFF, PI Nicole Cornilleau) et le magnétomètre continu, en conjonction avec les expériences particules. Pour analyser ces données, et utiliser de façon optimum toutes les corrélations existant entre les quatre satellites, une nouvelle technique a été utilisée, appelée Méthode de Filtrage-en- \mathbf{k} , qui permet de reconstituer les spectres spatiaux (en \mathbf{k}) pour des signaux spatialement échantillonnés en quelques points d'espace. Introduite et développée par J. L. Pinçon et F. Lefeuvre (LPCE, Orléans) aux débuts du projet (1991), cette méthode a été développée grâce aux premiers résultats de la mission CLUSTER et a permis en particulier de montrer que l'énergie des spectres turbulents observés provient d'une instabilité « miroir » dans la partie la plus basse du spectre et qu'elle cascade ensuite sur les hautes fréquences depuis les modes de la MHD jusqu'aux modes cyclotroniques (les modes de plus haute fréquence ne sont pas accessibles par cette technique) (Sahraoui et al, 2003, 2004a, 2004b, Walker et al, 2004). Un résultat important a également été établi : cette cascade n'est pas du tout isotrope : elle se développe de façon quasi 1-D dans la direction perpendiculaire au champ magnétique et à la normale à la magnétopause (Sahraoui et al, 2005)

La question principale à laquelle on tente de répondre aujourd'hui concerne le rôle de la turbulence magnétique dans la magnétogaine pour la pénétration du plasma du vent solaire à travers la frontière (Belmont et al, 2005). Cette pénétration repose en effet sur l'existence d'échelles suffisamment petites pour briser la loi d'Ohm idéale et le théorème du gel qui en découle (existence de reconnexion). Les échelles nécessaires s'expriment classiquement en fonction de la résistivité du milieu dans le cadre de la MHD résistive, mais il est clair, en l'absence de collision, que cette description est inadaptée et que les paramètres de la turbulence doivent être pris en considération à leur place. Le lien entre les grandes et les petites échelles, dans la région relativement homogène qu'est la magnétogaine peut être assuré, comme on vient de le voir, par des phénomènes non-linéaires assurant une cascade directe (locale en \mathbf{k}), ce qui justifie une approche de type « turbulence » du spectre des fluctuations. Belmont et Rezeau (2001) ont également montré comment les ondes UBF peuvent donner naissance à de très petites échelles lorsqu'elles interagissent avec le gradient de la magnétopause et peuvent être aussi une source efficace de reconnexion via un couplage (non local) entre échelles. Dans les deux cas, et contrairement aux modèles classiques qui font appel à une instabilité locale de la frontière (de type « instabilité de déchirement » par

exemple), la reconnexion peut exister avec une frontière stable mais perturbée par une source de turbulence extérieure. De plus, cette interprétation ne fait pas appel, comme on le fait classiquement, à une géométrie présumée qui contiendrait ces petites échelles de façon quasi-stationnaire (points en X).

L'observation de modes « presque linéaires » dans la magnétogaine reliés entre eux par une cascade directe a par ailleurs souligné la nécessité d'un modèle théorique de type « turbulence faible » pour interpréter les spectres. La théorie de la turbulence faible avait été développée ces dernières années dans le cadre de la MHD incompressible, en particulier par S. Galtier, ce qui avait permis de trouver des formes spectrales en lois de puissance comparables aux lois de turbulence de Kolmogorov et Iroshnikov-Kraichnan. Grâce à l'hypothèse d'incompressibilité, il était dans ce cas possible de mener les calculs analytiquement dans le cadre du formalisme Eulérien, c'est-à-dire en utilisant directement les variables physiques (vitesse, densité, champ magnétique, ...). Les observations dans la magnétogaine ayant montré que les effets tels que la compressibilité et l'effet Hall ne sont pas négligeables dans les modes mis en jeu, la théorie devait être prolongée dans un cadre plus large que la MHD incompressible, par exemple la MHD-Hall. Hélas, les équations du système sous leur forme Eulérienne deviennent alors tout à fait inutilisables car elles engendrent une complexité qui ruine tout espoir de modéliser la dynamique non linéaire. Pour résoudre ce problème, il a fallu se tourner vers le formalisme Hamiltonien des milieux continus. En important certains ingrédients de base développés notamment par l'école russe pour l'étude de la turbulence dans les fluides neutres, F. Sahraoui et ses co-auteurs (Sahraoui et al, 2003b) ont pu construire une formulation Hamiltonienne canonique pour la MHD-Hall. Grâce à elle, les calculs sur la dynamique non linéaire du système de la MHD-Hall peuvent maintenant être abordés avec de meilleures chances de succès.

E Effets de géométrie

Dans les systèmes complexes tels que la magnétosphère, la plus grande partie de l'énergie turbulente est injectée à grande échelle. A ces échelles, la géométrie globale possède généralement un rôle qui ne peut être ignoré, par les conditions limites et l'inhomogénéité qu'elle introduit. La compréhension de la propagation linéaire dans ces milieux inhomogènes, ainsi que celle des structures auto-cohérentes qui y sont possibles, est dès lors un préalable indispensable aux études de turbulence.

L'idée maîtresse de la thèse de Gabriel Fruit (CESR) était de décrire la réponse linéaire de structures magnétiques non-homogènes à des excitations extérieures, de quantifier l'échange d'énergie qui peut en résulter (par l'absorption résonante par exemple) et de le comparer aux observations. Il s'agissait de construire les fonctions de Green du système pour suivre complètement l'évolution spatio-temporelle des perturbations, sans se contenter de l'estimation de la réponse asymptotique du milieu. Il a ainsi reconstruit l'évolution spatio-temporelle de perturbations MHD affectant la magnétopause et la queue magnétosphérique. Les fréquences et les longueurs d'ondes caractéristiques ont été calculées, les perturbations résultant de divers types d'excitation reconstruites et la dissipation d'énergie associée au phénomène d'absorption résonante évaluée (Fruit et al, 2002, a, b). Il a été montré en particulier que, dans la région centrale de la couche de plasma, l'absorption s'effectue sur une distance de quelques rayons terrestre (5 à 20). Ces calculs ont été utilisés ultérieurement pour l'exploitation des données de l'expérience CLUSTER (Louarn et al, 2004 et Fruit et al, 2004).

De manière complémentaire, une analyse des structures magnétiques stationnaires a été entreprise en collaboration avec A. Tur et V. Yanovski. Une première étude a porté sur la description des structures pouvant exister dans des couches de courants mono-

dimensionnelles de type 'Harris', qui sont de bonnes approximations de la zone centrale des queues magnétosphériques. Des solutions bi-dimensionnelles d'extension limitée ont été obtenues (plasmoides), ainsi que des structures de type point X (Tour et al, 2001). Ces solutions proviennent d'un développement asymptotique délicat de l'équation d'équilibre qui permet de respecter les conditions aux limites. Il s'agit donc de solutions d'équilibre qui peuvent résulter de la dynamique d'une couche de courant. Il faut noter que ces solutions sont valables dans le contexte cinétique aussi bien que MHD. Dans un autre travail, il a été aussi démontré qu'il existe une analogie exacte entre l'hydrodynamique 2D incompressible et la magnéto-statique 3D. A partir de cette analogie, de nouvelles solutions de type 'flux-ropes' ont été construites. Les expressions obtenues sont analytiques et les solutions, exactes, possèdent un évident intérêt dans le contexte magnétosphérique et solaire (Yanovsky et al, 2002). Des solutions obtenues à partir d'une transformation du champ de vitesse de 2 vortex ponctuels ont ainsi été obtenues. Plus généralement, cette technique permet d'obtenir de nouvelles classes de solutions MHD.

F Phénomènes de filamentation

Comme on l'a vu, la turbulence est essentielle pour comprendre les échanges d'énergie, d'impulsion et de matière dans les régions de transition de la magnétosphère. Mais dans les plasmas sans collision, cette turbulence a la particularité de ne pas être « self similaire » : elle fait intervenir des phénomènes physiques de nature différente selon que les échelles concernées sont inférieures ou supérieures à des échelles caractéristiques telles que le rayon de Larmor des différentes espèces, la longueur d'inertie électronique, etc... Ceci confère une importance essentielle à la modélisation des phénomènes microphysiques. R Pottelette, M Bouhram, et M Malingre, en collaboration avec des spécialistes internationaux tels que R Treumann et J Pickett, ont étudié la question de la filamentation observée en région aurorale et qui pourrait être une filamentation d'ondes d'Alfvén. Ce phénomène est en effet exemplaire : les ondes d'Alfvén sont des perturbations de grande échelle qui transportent l'information sur de grandes distances des confins de la magnétosphère jusqu'à l'ionosphère et elles semblent se dissiper sous forme de petites structures cohérentes aux échelles électroniques. L'étude expérimentale de ces processus a reposé essentiellement sur les missions satellitaires CLUSTER, FAST et POLAR. Dans cette importante base de données, les régions où le bêta du plasma est petit ($< m_e/m_i$) et celui où il est grand (> 1) constituent des classes de comportement différent qui ont justifié des études séparées.

Dans les régions aurorales (bêta petit), les ondes d'Alfvén quasi-perpendiculaires sont de type dit « inertiel », ce qui signifie que l'échelle caractéristique est celle de la longueur d'inertie des électrons. Leur régime non linéaire mène alors à une dégénérescence sous forme de filaments porteurs de densités de courant très élevées qui est encore en cours d'étude. Grâce aux données conjointes des satellites CLUSTER et FAST, il a été possible de caractériser le rôle essentiel joué par les structures solitaires cohérentes dans les processus d'accélération des particules chargées et dans celui de la production de rayonnements électromagnétiques intenses (Berthommier et al, 2004). L'identification de structures tripolaires paraît résulter du piégeage de trous d'électrons par des trous d'ions. Ces structures pourraient être à l'origine de certaines structures fines dérivant en fréquence qui sont observées dans le spectre du rayonnement kilométrique terrestre (Pottelette et al, 2004, 2005a, 2005b). Dans la magnétogaine (bêta grand), des structures dipolaires sont observées, ainsi que la présence de deux populations d'électrons bien différenciées. La force pondéromotrice agissant sur les électrons semble avoir un rôle important, mais il reste encore à identifier les processus physiques qui conduisent dans ce cas à la formation des structures

de petite échelle, à la lumière des études théoriques entreprises sur cette question par les chercheurs de Nice (T. Passot et PL Sulem).

T Passot, PL Sulem et D. Laveder ont mis en évidence théoriquement le collapse d'ondes d'Alfvén en utilisant un formalisme d'enveloppe ainsi que par la simulation numérique directe de la MHD Hall (Laveder et al, 2002a, 2002b, 2003). Une condition sur l'extension minimale du paquet d'ondes initial a été établie et une étude sur des temps longs, grâce à un code AMR, a permis d'étudier la disruption des filaments lorsque les phénomènes hydrodynamiques deviennent prédominants. Un exemple expérimental de filamentation d'onde d'Alfvén à grand bêta a par ailleurs été mis en évidence par O Alexandrova et A Mangeney près du choc terrestre grâce aux satellites CLUSTER (Alexandrova et al., 2004).

Pour adapter ces études au cas non collisionnel qui est le plus courant en physique spatiale, le problème de la filamentation a été repris dans le cadre d'un modèle fluide amélioré, permettant de prendre en compte des effets cinétiques tels que l'effet Landau et les rayons de Larmor finis. L'approximation correspondante, dite «Landau-fluide», des équations de Vlasov-Maxwell est une analyse asymptotique dans la limite des grandes longueurs d'onde. Elle avait déjà été développée dans le domaine de la fusion mais a dû être adaptée pour prendre en compte les ondes d'Alfvén dispersives. Le modèle qui a été développé reproduit parfaitement la dispersion et la dissipation données par la théorie cinétique pour des ondes d'Alfvén dispersives obliques. Il a permis également d'étudier l'évolution d'ondes magnéto-sonores, les instabilités decay et modulationnelle d'ondes d'Alfvén parallèles et le chauffage induit par la résonance Landau (Passot et Sulem, 2003a, 2003b, 2003c, 2004a, 2004b, 2004c, 2005)). La prise en compte d'effets de rayons de Larmor finis à un ordre supérieur à deux est nécessaire pour modéliser les modes miroir comme observés dans la magnétogaine par F. Sahraoui et G. Belmont. Les fermetures en cours d'étude devraient le permettre prochainement.

Une réunion internationale « Alfvén 2004 » (Workshop on Space Science Environment Turbulence) a été organisée à Beaulieu les 13-19 avril 2004 où tous les problèmes précédents ont été exposés et discutés en présence des meilleurs spécialistes internationaux.

G Interactions ondes-particules et turbulence dans les chocs non-collisionnels

La structure des chocs dans les plasmas non-collisionnels résulte de processus de thermalisation liés aux interactions ondes-particules qui se produisent dans le pré-choc créé par la réflexion d'une petite fraction des particules incidentes et dans le choc lui-même.

La réflexion des ions du vent solaire sur le choc terrestre peut créer dans le pré-choc ionique des distributions ioniques non-gyrotropes extrêmement instables vis à vis de l'émission d'ondes électromagnétiques. Les observations faites par le satellite WIND [Meziane et al., 2001] et par les satellites CLUSTER [Mazelle et al., 2003 et 2005 ; Eastwood et al., 2003 et 2004] ont permis les premières identifications quantitatives de ces ondes en résonance cyclotron avec les faisceaux d'ions réfléchis sur le choc terrestre. Mazelle et al. (2003) ont établi par une analyse théorique les conditions de l'instabilité linéaire et démontré la formation des distributions en anneau par le piégeage des particules. Ces résultats théoriques expliquent fidèlement les observations [Mazelle et al., 2005]. Une modélisation de l'interaction faisceau aligné – plasma ambiant du vent solaire par une approche fluide Hall utilisant deux fluides ioniques distincts permet de reproduire assez fidèlement les propriétés des ondes observées [Sauer et al., 2005]. Méziane et al [2004b] ont pour la première fois rapporté l'existence simultanée dans le pré-choc ionique de deux populations d'ions sans qu'existe une instabilité du champ magnétique : la première est constituée d'un faisceau d'ions alignés avec le champ magnétique alors que la seconde, à plus haute énergie, est en giration. Ces observations simultanées peuvent être interprétées comme résultant d'un effet de rayon de Larmor fini au niveau d'une frontière séparant spatialement les deux populations. L'existence d'une telle frontière abrupte séparant ces deux types de populations n'avait jamais été rapportée et conduit à modifier la description standard du pré-choc ionique [Meziane et al., 2005].

Une étude approfondie des fonctions de distributions ioniques mesurées par CLUSTER dans le pré-choc, réduites aux vitesses parallèles par intégration sur les vitesses perpendiculaires au champ magnétique, a démontré pour la première fois l'existence de deux types de faisceaux alignés au voisinage du choc quasi-perpendiculaire): le premier type possède une distribution qui peut être ajustée très précisément par une Maxwellienne avec un degré de précision jamais atteint jusqu'alors; le deuxième type présente une "queue" non Maxwellienne à haute énergie. Les distributions réduites en vitesse parallèle des ions "groupés en phase de giration" présentent également le même caractère non Maxwellien pour des énergies suffisamment élevées. Aucune explication satisfaisante n'a encore été fournie à ces observations. Une étude statistique est en cours pour caractériser dans quelles conditions cette "queue" est présente. L'accumulation d'observations d'ions "groupés en phase de giration" et d'ondes cohérentes associées ont permis de valider la théorie proposée. La conservation de l'énergie dans le repère "de l'onde" a pu être vérifiée expérimentalement avec une bonne précision, ce qui démontre définitivement que ces distributions sont bien le résultat d'une interaction onde-particule et que leur nongyrotropie n'est pas le résultat d'un processus de réflexion au niveau du choc. Le processus de production n'est donc pas dépendant des conditions géométriques de la source des ions réfléchis contrairement à la réflexion spéculaire, qui apparaît comme un processus marginal dans la production de ce type de distribution dans le pré-choc.

Des résultats concernant le choc de Mars ont été obtenus à partir des observations récentes de sondes spatiales [Mazelle et al., 2004]. Des ondes extrêmement cohérentes ont été observées sur les composantes du champ magnétique mais l'absence de mesures simultanées

des distributions ioniques empêchent d'approfondir l'analyse expérimentale des processus microscopiques. Par contre les simulations hybrides globales tridimensionnelles de Modolo et al. (2005) permettent d'examiner la structure tridimensionnelle du choc martien et la dynamique des ions du vent solaire réfléchis ou transmis par le choc en plus de la dynamique des ions d'origine planétaire produits par différents mécanismes (échange de charge, photoionisation, collisions électroniques).

Signalons par ailleurs une étude expérimentale et théorique qui a mis en évidence une dégénérescence non linéaire d'ondes de Langmuir en présence d'inhomogénéités dans le préchoc électronique terrestre (Soucek et al., 2005).

Un effort particulier a été engagé sur l'origine et le rôle de la turbulence dans le choc terrestre. Plusieurs études motivées par la mission CLUSTER-2 ont été réalisées pour identifier les conditions de non stationnarité d'un choc strictement perpendiculaire, puis oblique, à l'aide de simulations numériques. Un modèle itératif de type hybride développé en collaboration avec l'Université de Fukuoka (Japon) a permis de démontrer que le choc perpendiculaire devient nonstationnaire par auto-reformation dès que la densité d'ions réfléchis dépasse une valeur critique, en bon accord aussi avec les résultats de simulations PIC [Hada et al., 2003]. En collaboration avec l'Université de Berkeley, Muschietti et Lembège (2005) ont montré que dans un choc perpendiculaire une turbulence électrostatique se déclenchait à la fréquence cyclotronique électronique dans le pied du front, par couplage entre le faisceau des ions réfléchis par le front et les électrons incidents. Enfin, des ondes d'Alfvén d'amplitude finie et des filaments magnétiques de petite échelle ont été mis en évidence expérimentalement à partir des observations de CLUSTER en aval du choc quasi-perpendiculaire (Alexandrova et al., 2004), analysés et modélisés par Alexandrova et Mangeney (2004).

Lembège et Savoini (2002) ont montré que la non stationnarité et la non uniformité du choc pouvaient considérablement affecter le temps de transit des électrons et leur gain d'énergie. Différents mécanismes ont été identifiés. En particulier, le mécanisme de réflexion "miroir magnétique" des électrons (accélération Fermi de type 1) contre le front a été retrouvé mais n'est certainement pas le mécanisme unique ou dominant intervenant dans la formation d'électrons réfléchis de haute énergie, contrairement à certaines idées acceptées depuis plus de 20 ans. Cette étude initialement motivée par l'étude du choc terrestre a de fortes implications pour l'étude des chocs solaires, planétaires et interplanétaires. Lembège et al. (2003) dans une première étude, dédiée aux chocs quasi perpendiculaires, ont déterminé pour quelle épaisseur de la rampe les électrons transmis pouvaient être non adiabatiques. Une seconde étude a permis de montrer que pour un choc strictement perpendiculaire dans un état stationnaire, même en présence de turbulence dans le choc, trois populations distinctes d'électrons transmis pouvaient exister: "adiabatiques", "sous adiabatiques" et "super adiabatiques" (Savoini et al., 2005).

Méziane et al [2004a] ont étudié les phénomènes de réflexion des ions au niveau du choc. L'analyse d'ions en giration dont le flux est modulé par des ondes de forte amplitude a permis de montrer que ces distributions d'ions étaient produites par un mécanisme de réflexion spéculaire au niveau du choc. Pour ce mécanisme, l'angle 'd'attaque' moyen des ions est égal à l'angle entre la normale locale à la surface du choc et la direction du champ magnétique interplanétaire. La modulation des flux s'explique par la modification de la géométrie locale du choc par l'onde de basse fréquence et de grande amplitude observée. On met en évidence comme prévu par la théorie une anti-corrélation entre le flux de particules et

l'angle avec la normale déterminé par un modèle à partir des caractéristiques des ondes observées. Il s'agit de la première vérification quantitative précise de ce phénomène de réflexion spéculaire. Ces processus de réflexion jouent un rôle central lors d'interactions choc/choc ou choc/discontinuité qui mènent à des formes particulières d'accélération. L'accélération de Fermi par les chocs (processus le plus communément invoqué en astrophysique) peut voir son efficacité multipliée lors d'interactions choc/choc ou choc/discontinuité. Ce résultat reste à exploiter d'un point de vue quantitatif. Cela passe par une estimation de l'efficacité de la réflexion des particules, ce qui nous ramène aux travaux précédemment décrits.

Tsubouchi et Lembège (2004) ont étudié la dynamique d'un choc quasi-parallèle pour la première fois à l'aide d'un code particulaire 1D PIC (contrairement aux études précédentes fondées sur des codes hybrides). Cette étude a confirmé les résultats acquis précédemment au moyen de codes hybrides : les ions réfléchis par le front forment un faisceau aligné avec le champ magnétique amont) qui en interagissant avec les ions incidents donne naissance à une instabilité d'ultra basse fréquence. Lorsque sa longueur d'onde est comparable à la longueur caractéristique du gradient, l'onde ULF se rétrécit, voit son amplitude augmenter pour atteindre une structure monolithique caractéristique nommée SLAMS (Short Large Amplitude Magnetic Structures). Les longueurs d'échelle sont en excellent accord avec les mesures expérimentales. Les simulations PIC montrent l'existence de structures de petite échelle, émises par le front de manière intermittente, qui n'existent pas dans les simulations hybrides et qui affectent fortement la dynamique du plasma en amont du choc.

Les différentes techniques de simulations du choc terrestre et les expériences numériques réalisées pour simuler les mesures in situ faite par la mission CLUSTER2 à travers le choc (techniques de satellites virtuels) ont été rassemblées dans une revue (Lembège, 2002). Un réseau de collaborations Japon-USA-Europe soutenu par l'ISSI (Berne, Suisse) a abouti à la rédaction d'une importante revue (Lembège et al., 2004). Lembège et al. (2005) ont replacé l'importance des études dédiées aux chocs dans le cadre plus général des études cinétiques menées sur les couches frontières de la magnétosphère. Les résultats expérimentaux les plus marquants obtenus sur le choc depuis le lancement de la mission CLUSTER sont rassemblés dans un livre de synthèse dédié à CLUSTER (Balogh et al., 2005).

Des ateliers annuels consacrés aux chocs non-collisionnels ont été organisés en 2002, 2003, 2004. L'atelier de 2004, tenu du 3 au 5 Novembre 2004, était le 6^{ème} "European Workshop on Collisionless Shocks" organisé par B. Lembège depuis 1991. Il a rassemblé environ 40 personnes dont une forte participation étrangère. Cet atelier est la suite d'une série organisée à Paris depuis Mars 1991. Les buts de cette série d'ateliers internationaux sont: (i) de forcer un rapprochement entre différentes communautés travaillant sur les plasmas spatiaux (Astrophysique, Solaire, Interplanétaire, Planétaire, Héliosphère) et non spatiaux (Fusion, Plasmas de laboratoire) ayant un centre d'intérêt commun: la macro- et micro-physique des chocs non collisionnels; (ii) d'attirer l'attention de ces communautés sur les techniques d'analyse de la turbulence applicables à la dynamique des chocs non-collisionnels; (iii) de favoriser une communication rapide et la comparaison des résultats les plus récents issus d'approches théoriques, expérimentales ou numériques. Lors de 6^{ème} atelier international environ 50% des communications présentées (invitées et non invitées) concernaient la mission CLUSTER. Les actes de ces ateliers sont publiés et un site Web "European Workshop on collisionless Shocks" est actuellement en cours de développement : il devra en particulier permettre d'accéder rapidement et dans le détail aux références de traversées du choc terrestre faites par la mission CLUSTER-II qui ont fait l'objet de présentations en

Novembre 2004, et de suivre ainsi les études en cours. Par ailleurs une banque de données a été installée au CETP pour mettre à disposition des participants à ces ateliers les résultats de simulations numériques de chocs non-collisionnels.

VI. Relations Soleil-Terre et Météorologie de l'Espace

Les relations Soleil-Terre et la météorologie de l'espace constituent un axe thématique transversal qui se situe à l'interface entre des disciplines différentes. Ses activités ont la particularité de pouvoir être de nature scientifique ou technique ; celles qui relèvent de la météorologie de l'espace sont destinées à répondre aux besoins des utilisateurs, ce qui implique une démarche souvent différente de celle qui prévaut dans les autres projets du PNST.

Plusieurs équipes françaises sont engagées de longue date dans des activités scientifiques qui relèvent de cette thématique. Les principales activités scientifiques sont aujourd'hui :

- L'étude multi-instruments d'événements solaires et de leur impact sur l'environnement terrestre.
- La modélisation de la dose de radiation absorbée lors de vols longs courriers
- La modélisation des ceintures de radiation
- L'observation et le suivi des conditions de l'ionosphère, en prenant en compte les caractéristiques du rayonnement ultraviolet du Soleil
- La mesure et l'archivage d'indices géomagnétiques

Ces activités reposent à la fois sur des moyens sol (SuperDARN, EISCAT, radiohéliographe, magnétomètres, ...), des données spatiales (SoHO, ACE, CLUSTER, ...) ainsi que des bases de données (généralement américaines).

Trois événements ont marqué ces dernières années. En 1999 eut lieu à Grenoble un atelier financé par le PNST et intitulé « Modèles, paramètres-clé et indices en météorologie de l'espace ». Cet atelier fit prendre conscience de l'importance de la thématique, alors émergente, de la météorologie de l'espace. De 2000 à 2002, plusieurs équipes françaises furent fortement impliquées dans une étude financée par l'ESA, qui portait sur la définition d'un programme européen de météorologie de l'espace. Cette étude permit à la France de se positionner en leader et de continuer à jouer aujourd'hui un rôle important sur le plan international. Enfin, en mai 2003 eut lieu à Orsay une campagne d'observation MEDOC où pour la première fois l'exploitation coordonnée d'instruments sol et spatiaux fut mise à profit pour observer la chaîne d'interactions Soleil-Terre.

Projets soutenus par le PNST

Relevons tout d'abord **l'étude multi-instruments des relations Soleil-Terre**, organisée dans le cadre de campagnes d'observation MEDOC. Cette étude a permis de faire fonctionner simultanément un nombre inégalé d'instruments sol (EISCAT, SuperDARN, magnétomètres,...) et spatiaux (SoHO, CLUSTER, ACE, ...). Trois campagnes ont déjà eu lieu et d'autres sont prévues. Dans les trois cas, des événements solaires ont pu être étudiés depuis leur genèse dans l'atmosphère solaire jusqu'à leur impact sur la magnétosphère, l'ionosphère et le sol terrestre (Hanuise et al., 2005). C'est lors d'une de ces campagnes que

les premiers résultats de l'interféromètre EPIS ont révélé une intensification du vent thermosphérique (Thuillier et al., 2005).

La caractérisation et le suivi des **conditions de l'ionosphère et de la thermosphère** sont importants pour les télécommunications ainsi que pour la prédiction en orbitographie. Les deux paramètres-clé sont les profils électroniques et la densité neutre. Des études exhaustives du premier ont été menées par Lilensten et al. à l'aide d'instruments sol (EISCAT, ionosondes) et de mesures GPS. La comparaison avec des simulations du modèle TRANSCAR ont montré que les données GPS sont souvent erronées (Lilensten et Cander, 2003). Cette erreur serait due à la contribution de la plasmasphère, alors que l'impact de la thermosphère est négligeable (Lilensten et al., 2004b+c). Toutes les données EISCAT nécessaires à ces études sont aujourd'hui disponibles dans une base de données hébergée par le LPG, à Grenoble.

Parallèlement à cela, diverses études ont été menées pour déduire les **propriétés de l'atmosphère neutre** à partir de comparaisons entre le modèle TRANSCAR et des mesures à assimiler (contenu électronique total, ...). Witasse et al. (1999) avaient suggéré d'utiliser les raies rouge et verte de l'oxygène atomique comme traceurs du système couplé thermosphère-ionosphère. Ce travail a été repris à plus grande échelle par F. Culot dans sa thèse (Culot et al., 2004), en utilisant les données d'UARS, EISCAT et les simulations du modèle TRANSCAR, dans lequel la modélisation de ces raies est désormais incluse. Les derniers résultats montrent que la raie verte convient bien comme traceur de l'atmosphère neutre, même pendant des périodes de forte activité géomagnétique (Culot et al., 2005). Dans une comparaison entre des mesures de la température thermosphérique (déduites du satellite UARS) et les résultats du modèle semi-empirique MSIS, Lathuillère et Menvielle (2004) ont révélé l'importance de la prise en compte de l'activité géomagnétique.

Les études ci-dessus montrent l'intérêt des **paramètres réduits** (ou traceurs) tels que les indices géomagnétiques. Le CETP héberge le Service International des Indices Géomagnétiques (IGSI), dont la principale fonction est l'élaboration et la dissémination des indices géomagnétiques. Il existe actuellement un regain d'intérêt pour ces indices et des études sont menées pour augmenter leur résolution temporelle (Menvielle, 2005). Dans son travail de thèse, F. Pereira (2004) a ouvert une voie différente, dans laquelle il a montré qu'il était possible de définir de nouveaux indices à partir d'une analyse statistique du champ géomagnétique.

Le **flux solaire énergétique EUV** est un des paramètres-clé pour modéliser et prédire les conditions de l'ionosphère ; plusieurs missions récentes (étrangères) lui sont consacrées. Or les difficultés rencontrées dans la mesure continue d'un spectre calibré ont favorisé le développement de méthodes alternatives. Dans sa thèse, M. Kretzschmar a montré à partir de données de SoHO et de simulations avec le code CHIANTI qu'il est possible de reconstruire le spectre EUV à partir de la mesure de quelques raies seulement (Kretzschmar et al., 2004a+b). Cette étude a ensuite été reprise sur une base statistique et avec des données du satellite TIMED par T. Dudok de Wit et al. (2005), qui ont identifié les meilleurs choix de raies. Non seulement le spectre peut être reconstruit avec une bonne précision mais en plus l'analyse révèle des propriétés intéressantes de la variabilité du spectre EUV.

L'émission radio métrique (obtenue avec le radiohéliographe de Nançay) constitue une autre source d'information importante pour suivre le développement d'événements solaires géoeffectifs. Plusieurs études ont été consacrées (Pick et al., 2003) au suivi des éjections de

masse coronales (CME), dont une a pu être suivie jusqu'à plus de 3 rayons solaires (Bastian et al., JGR, 2001). Les données de SOHO/EIT et LASCO, du radiohéliographe de Nançay et de WIND ont été exploitées par P. Ballatore dans sa thèse pour étudier le lien entre les CME au soleil, dans le milieu interplanétaire et la signature observée ensuite sur la chaîne de radars SuperDARN (Ballatore et al., 2001, Vilmer et al., 2003). Il est aussi intéressant de noter que les propriétés statistiques des échos radars permettent d'identifier la projection ionosphérique des frontières de la magnétosphère (André et al., 2003). Ce résultat est actuellement exploité par G. Lointier dans sa thèse pour mettre au point un système de suivi en temps réel de ces frontières.

Le PNST et le CNES ont aussi soutenu des actions scientifiques dont l'objectif principal est l'administration de la recherche et la coordination d'activités dans le cadre de la météorologie de l'espace. Le cadre futur de la météorologie de l'espace est incertain, et en attendant la mise en place d'une structure internationale, il est important de maintenir un contact permanent avec les utilisateurs potentiels et les futurs acteurs, en particulier l'Union Européenne. F. Lefeuvre est actuellement président du Space Weather Working Team, qui est la principale structure de conseil auprès de l'ESA. En 2003 a démarré l'action COST 724 « Developing the scientific basis for monitoring, modelling and predicting space weather » dont J. Liliensten est le président (Liliensten et al., 2004a). Cette action réunit plus de 25 pays et durera 4 ans. La communauté française est bien représentée dans ses différents groupes de travail.

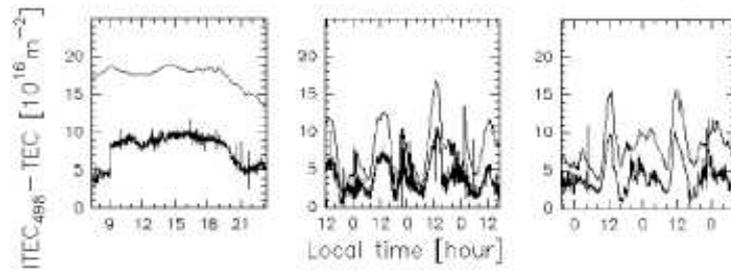


Figure VI.1 : Mesure du contenu électronique total (TEC) par satellite GPS (trait fin) et par les radars EISCAT (trait épais), à trois instants différents. Le rapport entre les deux valeurs varie considérablement (Lilensten et Brelly, 2001).

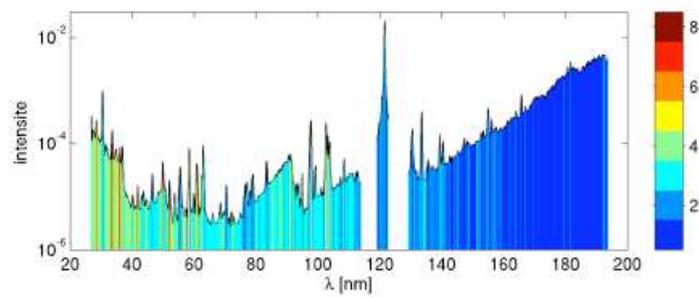


Figure VI.2 : Le spectre EUV mesuré par TIMED, moyenné sur un an. Les couleurs désignent huit classes d'équivalence, dont les raies ont sensiblement la même dynamique temporelle. Dans un tel cas, il faudrait choisir une raie de chaque classe pour reconstruire correctement le spectre (Dudok de Wit et al., 2005).

VII. Bases de données

Les données de la communauté Soleil-Terre sont principalement rassemblées dans 3 bases de données : le CDDP à Toulouse, pour les données Plasma (sol et satellites), BASS2000 à Meudon et Tarbes, pour les données solaire sol, et MEDOC à Orsay, pour les données SOHO, TRACE et CORONAS. Les publications utilisant ces bases de données se retrouvent naturellement dans la liste générale des publications de la communauté. Le PNST a en charge le fonctionnement de la partie scientifique du CDDP au CESR, de BASS2000, et a financé une série d'Ateliers « Bases de données/Logiciels SOHO » organisés par MEDOC. Il faut noter l'implication des trois bases de données de la communauté dans le développement de l'Interopérabilité, en vue de construire des Observatoires Virtuels (OV), et leur participation à l'Action Spécifique Observatoire Virtuel, créée en 2004. En particulier, BASS2000 et MEDOC ont activement participé au projet Européen EGSO, prototype opérationnel d'un Observatoire Virtuel Solaire.

A Le Centre de Données de la Physique des Plasmas

Créé en 1998 à travers un accord entre l'INSU et le CNES, les principales missions sont (i) d'archiver et d'assurer la préservation pérenne des données obtenues sur les plasmas naturels par les expériences à participation française, (ii) d'encourager leur valorisation par la provision des Services à Valeur Ajoutée (SVA) et (iii) de participer activement aux grands projets d'archivage et de mise à disposition des données plasmas, à l'échelle nationale, européenne et internationale.

Les données aujourd'hui préservées au CDDP (figure VII.1) couvrent une période s'étendant de la fin des années 70 (GEOS, ISEE, ARCAD, puis VIKING) à nos jours (programme ISTP: INTERBALL, WIND; projet CLUSTER). Elles incluent aussi des mesures de l'environnement terrestre obtenues au sol (EISCAT/ESR, Indices Géomagnétiques), dans l'héliosphère (ULYSSE) et au voisinage de comètes (GIOTTO).

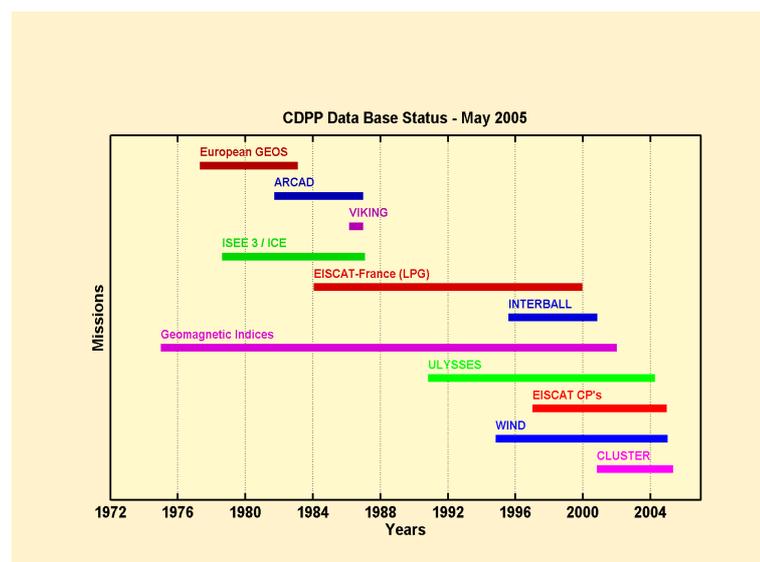


Figure VII.1 : Principales données archivées au CDDP. Les quicklooks des données EISCAT-France sont accessibles au CDDP, alors que les fichiers correspondants sont archivés dans la base du LPG (www-eiscat.ujf-grenoble.fr) associée au CDDP. Les Indices géomagnétiques, produit par le Service des Indices du CETP, peuvent être utilisés pour sélectionner un jeu de données.

Les principaux Services à Valeur Ajoutée, développés pendant ses 4 dernières années, incluent : - la mise à disposition de bibliothèques de transformation de coordonnées et de positionnement du satellite par rapport aux zones clefs de la magnétosphère terrestre - la possibilité de faire des graphiques à la carte à partir de données aussi différentes que celles de WIND, CLUSTER ou EISCAT – la création de tables d'évènements à partir des Indices géomagnétiques.

Le CDPP a aussi investi une part importante de son activité dans le développement de l'interopérabilité. Ainsi, le CDPP est membre fondateur de la collaboration internationale SPASE (Space Physics Archive Search and Extract) et participe activement à la définition du modèle des données et du dictionnaire des méta-données. Il préside également l'élaboration du dictionnaire de méta-données du CAA (Cluster Active Archive) et est impliqué dans le projets Eu-SSVO soumis à l'Union Européenne dont le but est de préparer la construction de l'Observatoire Virtuel Système Solaire à l'échelle Européenne.

La modification du protocole d'accord CNES/CNRS, aujourd'hui soumise aux tutelles, devrait aboutir à une meilleure interaction avec la communauté, en particulier pour le développement de nouveaux Services à Valeur Ajoutée, grâce à la mise en place prochainement d'un Comité d'Utilisateurs en principe indépendant de l'exécutif du CDPP.

B BASS 2000

BASS 2000, dont les taches principales sont l'archivage, la pérennisation et la diffusion des données solaires sol françaises, est répartie sur 2 sites, à Meudon et à Tarbes. L'archive long terme de Tarbes, opérationnelle depuis 2000 sous Oracle, contient les données du télescope THEMIS et du Radiohéliographe de Nançay. L'archive de Meudon, opérationnelle depuis 1996, a subi une refonte complète sous Oracle en 2002.

A Tarbes, le catalogue actuel contient 4.2 To de données spectropolarimétriques brutes du télescope THEMIS (campagnes 1999 à 2004 incluse), ainsi que 625 Go de données brutes du Radiohéliographe de Nançay (depuis 1997). L'interface de requête a été complexifiée depuis la campagne 2004, afin de mettre en place une possibilité de sélection plus forte des données, à partir des mots clefs validés par THEMIS. 36% des données THEMIS ont été envoyées aux observateurs au cours des 5 dernières années. La fourniture de données dépouillées est la première solution mise en œuvre pour accroître l'intérêt de la communauté nationale et internationale pour des données THEMIS. Une bonne partie des données du mode DPSM sera analysé (avec le code de P.Mein) d'ici fin 2006. Le développement pour le mode MTR se fera à l'automne 2005, et le dépouillement de l'ensemble des données suivra. Les conditions de dépouillements des modes DPSM et MTR ont été discutées avec la communauté lors de plusieurs ateliers organisés à Tarbes.

L'ensemble des données du Coronographe du Pic du Midi sera archivé à Tarbes au cours de l'année 2005. Les données seront disponibles sous forme brutes et traitées (calibrées et recentrées). Leur intégration dans le catalogue a débuté en juin 2005.

A Meudon, le catalogue contient l'essentiel des données solaires sol de nature synoptique (100 Go), le plus souvent sous une forme directement utilisable. Ces données, en provenance d'instruments de Meudon, de Nançay et du Pic du Midi, sont mises en ligne très rapidement (dans la journée) afin de servir à la préparation des observations : elles incluent une sélection de quelques images brutes par jour du Coronographe du Pic du Midi, des cartes en radio produites à partir des données brutes de Nançay pour 2 fréquences, des cartes synoptiques (avec une interface de suivi des centres actifs et plages) très utiles pour les observateurs.

L'équipe de Meudon s'est également investie dans les projets d'Observatoire Virtuel européen, en particulier EGSO (financé jusqu'en juin 2005). Un logiciel de reconnaissance de formes (filaments, régions actives) a été développé, avec l'objectif de constituer une archive de structures assorties de leurs principales caractéristiques. EGSO propose également la possibilité d'interroger l'archive de Meudon à partir d'un site commun aux participant à EGSO.

On notera finalement la participation de BASS2000 à des activités de diffusion de la connaissance, avec en particulier un service de réponse à des questions posées sur le site web.

C Ateliers « Bases de données/Logiciels SOHO » organisés par MEDOC

Suite à l'ouverture en Octobre 2000 de l'archive SOHO (à MEDOC en France, au RAL en Angleterre et à la NASA aux USA), les accès aux données se sont multipliés ainsi que le nombre des utilisateurs. Une aide ponctuelle est évidemment apportée par les experts MEDOC à chaque visiteur désireux de se sortir du labyrinthe des logiciels de réduction des données, toutefois, afin d'optimiser les efforts de l'équipe scientifique MEDOC, une série d'ateliers a vu le jour, ateliers ouverts à une plus forte participation (15 à 20 personnes) et couvrant un champ plus large que celui de SOHO. Le premier atelier, organisé dans le cadre du réseau européen « Turbulence in Space Plasma » a eu lieu fin Octobre 2003 et a rassemblé 17 « étudiants » dont 9 français du PNST. Il portait sur l'analyse des données EIT, SUMER et CDS à bord de SOHO et sur les données TRACE, RHESSI et CORONAS. Un deuxième atelier, prévu pendant l'automne 2005 portera sur STEREO dont les données arriveront à MEDOC dès le début 2006. Enfin un troisième atelier doit être organisé début 2006 autour de la thématique des Relations Soleil-Terre. Il sera tourné vers l'analyse conjointe d'un même événement vu depuis le Soleil avec SOHO et RHESSI, jusque dans l'environnement terrestre via CLUSTER, SuperDarn, EISCAT et ESR, comme celui de Mai 2003, observé pendant lors de la 11^{ème} campagne MEDOC, et pour lequel une collaboration a vu le jour entre l'IAS, le LESIA, le CETP, le LPCE et le LPG (voir Chapitres 4 et 6).

VIII. Instrumentation sol cofinancée par, ou du ressort du PNST

Ce rapport concerne les instruments sol financés par le PNST ou les instruments nationaux du ressort du PNST en dehors du TGE THEMIS: Service d'observation de la couronne solaire (OMP), service d'observation du soleil (OP), EISCAT/ESR (gestion du temps français), Radiohéliographe de Nançay, participation française à SuperDARN, Lunette Jean Rösch. Les publications utilisant ces instruments se retrouvent naturellement dans la liste générale des publications de la communauté

A) EISCAT/ESR (gestion du temps français d'observation)

Le PNST apporte son soutien à la gestion du temps français d'EISCAT/ESR, les dépenses de fonctionnement des radars ainsi que les missions sur le site étant prises en charge par l'INSU. Le soutien PNST est essentiel pour organiser les observations sur bien des points : préparation des campagnes d'observation, sélection des projets, travail en atelier permettant de définir des nouveaux modes d'exploitation et de discuter des codes de dépouillement et de visualisation des données, participation aux workshops EISCAT et préparation des interventions, organisation des données recueillies sous forme de base.

B) Participation française à SuperDARN

La participation française au réseau de radars SuperDARN se fait en cofinancement INSU/PNST. La participation française comporte deux radars sur un total de 17, l'un en Islande et l'autre aux Kerguelen. Ces radars permettent de mesurer les vitesses du plasma ionosphérique et d'étudier la dynamique spatio-temporelle des mouvements de convection. Le réseau participe à de nombreuses observations coordonnées sol/espace (exemple de CLUSTER, campagnes MEDOC avec SOHO) et sert à de fructueuses collaborations, souvent dans le cadre de travaux collectifs multi instruments. Le financement PNST sert essentiellement au fonctionnement technique des installations. La prospective porte sur l'extension du réseau vers les latitudes moyennes et également dans les zones aurorales et polaires (projet pour le Dôme C).

C) Service d'Observation solaire de l'Observatoire de Paris

Ce service d'observation fonctionne depuis près d'un siècle. Bien que le PNST ne participe pas à son fonctionnement (pris en charge en totalité par l'OP), il a bénéficié dans le passé de crédits d'équipement de l'ex GDR « Soleil » et est susceptible de solliciter le PNST dans le futur dans ce même cadre. Le service réalise des observations journalières monochromatiques à l'aide du spectrohéliographe et de l'héliographe « □ variable », observations qui sont placées en temps réel sur Bass2000. Le service fonctionne 365 jours par an et réalise, rotation par rotation, les cartes synoptiques de l'activité solaire. A Nançay, il gère l'antenne multifréquence des flux globaux dont les données sortent aussi sur le Web.

D) Service d'Observation de la couronne, Observatoire Midi Pyrénées

Le service d'observation de la couronne fonctionne depuis 10 ans et s'appuie sur une équipe d'observateurs bénévoles réunis au sein d'une association privée, les « observateurs associés » (OA) qui se relaient par équipe de deux tout au long de l'année. Ce programme a été mis en place en soutien SOHO et porte actuellement sur la couronne froide. La dynamique des protubérances est observée en connexion avec les éjections de masse coronale (CME) par SOHO. Le fonctionnement est à la charge des OA, de l'OMP et du PNST. Un nouvel instrument, permettant la mesure simultanée des composantes froides et chaudes de la couronne, prendra la succession du coronographe actuel (HACO) en 2006 pour accompagner les futures missions spatiales STEREO et SDO.

E) Radiohéliographe de Nançay

Le radiohéliographe (RH) de Nançay (OP) bénéficie du soutien de base de l'Unité Scientifique de Nançay (OP) et d'une contribution du PNST pour assurer son fonctionnement. Au cours des dernières années, un gros financement FNADT a permis l'adjonction de 4 antennes supplémentaires pour combler le manque d'interféromètres à courte base. De nombreux travaux de jouvence (électromécanique, capteurs, informatique) ont été réalisés et l'instrument est très fiable. Le support STEREO constitue la priorité des 4 prochaines années. A plus long terme, le RH trouvera sa place dans une perspective internationale aux côtés d'autres instruments comme FASR et le RH chinois, bien répartis en longitude, et permettant d'observer le soleil en continu (relations Soleil-Terre, soutien SOLAR ORBITER).

F) Lunette Jean Rösch, Observatoire Midi Pyrénées

La lunette Jean Rösch (LJR) fonctionne avec le soutien du PNST, du LATT (OMP) et du LESIA (OP) à parts à peu près égales. Des instruments nouveaux et originaux, optimisés pour le site, ont été récemment installés ou sont en cours de développement. On peut citer la polarimétrie à cristaux liquides, introduite avec succès en 2003 (financée par le LESIA), et la caméra rapide à grand champ (10') CALAS bientôt opérationnelle (financée par une ACI Jeune Chercheur). Les programmes sont orientés vers la haute résolution spatiale en spectro polarimétrie et en imagerie, et les grands champs, avec une prospective à l'échelle d'un cycle solaire. Une nouvelle caméra spectroscopique, financée par l'OP, s'ajoutera au dispositif en 2006. Une jouvence des grands axes, financée par l'OMP, est également en cours. La LJR participe à des campagnes sol/espace (JOP 178). Citons enfin l'héliomètre utilisé pour la mesure de la déformation du soleil ainsi que certaines expériences préparatoires à PICARD.

Prospective 2006-2009

I. Mesure des champs magnétiques dans l'atmosphère solaire

A. Les développements instrumentaux au sol

1. *Etat des lieux*

- *THEMIS*

Les opérations de fiabilisation du télescope menées pendant les dernières années, mais surtout l'incorporation en ligne d'outils de dépouillement et d'inversion du champ magnétique pour le mode MTR en 2004, ont porté leur fruits. Ainsi, nous avons vu apparaître des cartes magnétiques sur des grandes régions solaires, en particulier les régions actives et filaments associés. La sensibilité polarimétrique a été démontrée par de nombreuses observations :

- première mise en évidence de creux (« dips ») et boucles magnétiques dans les canaux de filaments quiescents associés à la morphologie de ces filaments,
- détection de polarisation circulaire anormale sur la raie $H\alpha$, liée à des champs électriques chaotiques dans le plasma d'une protubérance, dans des conditions limites de contrôle de la lumière diffusée,
- détection de structures magnétiques photosphériques de tailles de 10 km, bien plus petites que l'élément de résolution lui-même ; une telle résolution spatiale n'est accessible que grâce à l'analyse des raies spectrales, en particulier de leur polarisation, qui ne porte l'information que des structures magnétiques,.

Les outils de base pour arriver aux mesures du champ magnétique sont disponibles en ligne et en temps réel, et ne demandent pas de l'observateur une connaissance approfondie des techniques spectropolarimétriques.

- *La lunette Jean Rösch /Observatoire du Pic du Midi (LJR)*

La LJR reste un instrument d'équipe important et complémentaire de THEMIS pour la spectropolarimétrie grâce à de multiples possibilités qui lui confèrent son originalité:

D'un point de vue scientifique :

- accès à la spectropolarimétrie à haute résolution spatiale de $0.3''$
- accès au domaine bleu et proche UV du spectre solaire, là où se trouvent les raies de diffusion les plus polarisées du second spectre

D'un point de vue technique, la LJR n'a pas les contraintes inhérentes à un grand télescope et offre ainsi deux avantages précieux :

- la possibilité pour les astronomes d'y mener des expériences nouvelles et d'y effectuer les développements instrumentaux nécessaires (exemples : polarimétrie à cristaux liquides, caméra grand champ)
- disponibilité et souplesse

La LJR subit actuellement une jouvence qui lui permettra de rester concurrentielle pendant les 10 prochaines années en spectropolarimétrie.

2. Prospective

- THEMIS

L'évolution instrumentale de THEMIS se fonde sur des améliorations de la sensibilité polarimétrique et de la qualité d'image. Le principal problème pour la mesure de la polarimétrie que voient aujourd'hui les utilisateurs est le déplacement de l'image engendré par la turbulence atmosphérique, ou seeing. Ce seeing rend la photométrie différentielle, qui est la base de la mesure polarimétrique, très difficile au niveau de précision requis (10^{-5}).

Deux voies doivent être explorées pour rendre négligeable cette source d'erreur : La première est l'accélération de la cadence d'acquisition, nécessitant des caméras et un polarimètre plus rapides. La seconde est la stabilisation de l'image avec l'aide d'un tip-tilt, puis d'une OA, si elle se révélait incontournable pour les performances du télescope. Les atouts de THEMIS se concentrent sur l'absence de polarisation instrumentale et sur les possibilités multi-raies, et c'est dans cette perspective d'amélioration de la qualité polarimétrique que l'amélioration des images doit être cadrée. La deuxième voie exploitable est celle qui est pour l'instant le monopole de THEMIS: la possibilité de multi-raies simultanées. Dans ce domaine peu a encore été fait, principalement parce qu'étant le seul instrument à fournir cette fonctionnalité, on ne trouve pas aujourd'hui dans la communauté internationale une expertise qui aurait pu aider à accélérer les travaux à THEMIS. Il s'agit donc d'un savoir-faire unique dont les utilisateurs de THEMIS doivent poursuivre l'exploitation et le développement.

Ces qualités uniques continueront de faire de THEMIS une référence indiscutable pendant au moins les 5 prochaines années, et même au-delà si les développements instrumentaux en cours se poursuivent.

- ATST

Le savoir-faire acquis dans l'instrumentation polarimétrique est également un atout pour une collaboration avec des instruments plus ambitieux comme l'ATST (projet de télescope « versatile » solaire de 4 m conduit par nos collègues américains). Ce savoir-faire est recherché et demandé et nous ouvre des portes dans un projet qui, à l'instant de voir le jour, marquera un avant et un après dans la discipline. La communauté solaire française, et en particulier les polarimétristes, ne peuvent pas se permettre de laisser passer l'opportunité de participer à un projet d'une telle envergure. Il serait souhaitable qu'une telle participation se situe au niveau d'un effort concerté européen, et dans ce but nous poursuivons des rencontres sur le thème de l'ATST avec nos collègues européens, espagnols et allemands en particulier. Si une collaboration européenne n'aboutissait pas, il y aurait d'autres voies à explorer dans la collaboration directe grâce au savoir-faire acquis avec THEMIS.

B. Les développements théoriques

1. La théorie du second spectre solaire

Le second spectre solaire est le spectre de la polarisation linéaire formée par diffusion au bord du disque solaire. Cette polarisation qui est la signature de la polarisation atomique induite par l'anisotropie du rayonnement à la surface, peut être modifiée par un champ magnétique faible (de 10 à quelques dizaines de Gauss pour les raies dans le visible en fonction des

caractéristiques de la raie). Cette modification de la polarisation atomique est l'effet Hanle, qui dépend de la sensibilité de la raie et se manifeste par une dépolarisation et une rotation de la direction de polarisation. Or, aucune rotation du plan de polarisation n'a jamais été détectée dans le second spectre solaire, ni par THEMIS ni par d'autres, ce qui conduit à un modèle de champ "turbulent" (i.e. dont la structure spatiale n'est pas résolue).

La polarisation étant produite par une inégalité de populations de sous-niveaux Zeeman, et éventuellement l'existence de cohérence, elle ne peut être décrite qu'en dehors de l'équilibre statistique. A part éventuellement les raies moléculaires invisibles en intensité, la modélisation du second spectre solaire fait intervenir la formation des raies hors-ETL: équilibre statistique et transfert de rayonnement couplés, en tenant compte de la polarisation et des cohérences. Dans ce domaine, plusieurs codes ont été développés en France, en formalisme de la matrice densité et en formalisme de la fonction source. Ce dernier formalisme a permis l'introduction de la redistribution partielle. Ces formalismes ont été appliqués avec succès à l'interprétation d'observations, conduisant au diagnostic du champ magnétique turbulent. En ce qui concerne les perspectives, les directions suivantes peuvent être dégagées:

- ces formalismes sont limités de façon fondamentale à l'atome à deux niveaux. Or beaucoup de raies du second spectre n'entrent pas dans cette approximation. Il faudrait développer des méthodes multi-niveaux, mais cela n'est pas un problème simple. La solution ne pourra être qu'itérative, comme pour certains programmes développés à l'étranger.
- le second spectre solaire fait apparaître des raies moléculaires invisibles en intensité. Nous avons déjà commencé à développer des modèles adaptés à ces raies car le transfert de rayonnement peut être simplifié. Pour l'instant ces modèles sont aussi à deux niveaux, ce qui ne convient pas pour des bandes moléculaires: là encore, il faudrait développer des méthodes multi-niveaux.
- la presque totalité des coefficients de dépolarisation collisionnelle ne sont pas connus à l'heure actuelle, or ils sont un ingrédient du calcul d'équilibre statistique de la polarisation. Il faut développer ces calculs, sur lesquels la France a une expertise unique au monde, en particulier pour les raies moléculaires.

2. L'effet Zeeman hors-ETL

La polarisation des raies d'absorption chromosphériques est mesurée aussi bien dans des régions actives que dans les régions calmes près du limbe solaire. Elle contient des informations sur la distribution des champs magnétiques dans la chromosphère. Ces raies se formant hors équilibre thermodynamique, il est nécessaire comme dans le cas du second spectre solaire de résoudre simultanément les équations d'équilibre statistique des sous-niveaux Zeeman et les équations de transfert de rayonnement polarisé. Il faudra développer des codes prenant en compte les effets de couplage multi-niveaux ainsi que les cohérences éventuelles entre niveaux (cohérences présentes dans le cas des champs magnétiques dits « intermédiaires » pour lesquels le décalage Zeeman est beaucoup plus faible que la largeur Doppler des raies).

3. Transfert de rayonnement polarisé dans des structures à deux ou trois dimensions et/ou dans des milieux turbulents

Les observations à haute résolution spatiale et haute sensibilité polarimétrique actuellement réalisés sur THEMIS et sur la LJR permettent d'envisager l'étude de la distribution des champs de vitesses et magnétiques à petite échelle (inférieure à la taille des granules) dans la photosphère solaire. On a de plus en plus d'évidence que le champ magnétique est de nature turbulente à petite échelle, mais la fonction de distribution de l'intensité magnétique turbulente et ses liens avec la distribution en vitesses restent à déterminer. L'interprétation des observations nécessite de développer des codes de transfert de rayonnement polarisé dans des structures à 2 ou 3 dimensions (granules/inter-granules par exemple) d'une part, et de définir des paramètres globaux permettant une description statistique des champs à petite échelle. Pour cela il faudra s'appuyer sur des calculs des paramètres de Stokes en milieux aléatoires.

4. Modèles MHD : quels développements ? quelles contraintes observationnelles ?

La modélisation MHD des structures magnétiques de la couronne se fait en liaison étroite avec les observations multi-longueurs d'onde et de magnétographie. Cette combinaison a permis, dans les dernières années, d'identifier des structures coronales pré-éruptives et des sites possibles d'instabilités et de dissipation d'énergie. Pour les années à venir, il paraît important de développer ces outils à un moment où la magnétographie vectorielle de la mission Solar B apportera des éléments nouveaux. Nous mentionnons en particulier

1. les méthodes semi-analytiques qui exploitent les propriétés des équations de la MHD pour le diagnostic global du chauffage coronal dans les régions actives ;
2. la théorie des quasi-séparatrices appliquée aux éruptions et à l'intermittence du chauffage coronal ;
3. les méthodes novatrices d'analyse pour la mesure de l'injection (resp. de l'éjection) d'hélicité magnétique par émergence et cisaillement de flux magnétique (resp. par évacuation vers le milieu interplanétaire dans les éjections coronales de masse) ;
4. les applications des extrapolations magnétiques pour la modélisation et la réalisation de prédictions théoriques pour les processus d'émergence résistive de flux, pour les gradients de champ magnétique dans les protubérances, et pour le couplage d'échelles lors du déclenchement des éjections coronales de masse;
5. la simulation numérique en 3D pour le couplage de la photosphère à la couronne et pour le déclenchement des phénomènes éruptifs.

C. La mesure des champs magnétiques dans la couronne

La mesure du champ magnétique coronal devient une question centrale de la physique solaire qui détermine les progrès ultérieurs dans la physique coronale (boucles, reconnexion, chauffage, accélération du vent, ...). Il est la clef de la structure et de l'évolution de la couronne et, de ce fait, des plasmas de l'Héliosphère. Bien que ce constat soit déjà ancien, il gagne en actualité par plusieurs développements indépendants qui montrent la faisabilité technique des mesures du champ magnétique dans les années à venir: la possibilité des mesures coronographiques de l'effet Zeeman dans le domaine infra rouge, le concept de spectro-imageur en ondes radioélectriques (FASR) et la perspective de la polarimétrie dans l'UV. Les chercheurs regroupés au PNST ont des possibilités de contribuer à des avancées significatives grâce à l'expertise en instrumentation dans ces domaines.

1. Mesures coronographiques en lumière visible

La méthode la plus directe pour mesurer le champ magnétique dans la basse couronne est la polarimétrie des raies d'émission. La mesure des très faibles signaux Zeeman attendus dans ces raies est difficile, cependant deux expériences sont en cours aux Etats-Unis, s'intéressant à des raies en proche infra rouge. Des publications récentes ont montré que cette technique, dont le principe est envisagé depuis longtemps, commence à être réalisable. La période est donc propice pour intensifier les efforts de mise au point des techniques coronographiques en lumière visible, conjointement avec les autres méthodes mentionnées ci-dessous.

La communauté française a proposé d'installer une expérience de magnétométrie coronale au Dôme C qui pourra bénéficier des conditions de ce site (haute résolution spatiale, pureté du ciel) pour l'étude de la couronne la plus interne, inobservable autrement. Un tel instrument est également considéré pour le Pic du Midi (prospective 2010+), à une latitude complémentaire des îles Hawaï où seront installés les instruments américains pour ces mesures, l'ATST et le projet d'un coronographe de grande taille dédié. Une première phase des études doit être l'installation d'un *Sky Brightness Monitor* permettant de comparer les qualités coronographiques des sites d'Hawaï, du Pic du Midi et du Dôme C. Le projet de vol en formation ASPICS2 soumis au CNES prévoit la mesure de la direction du champ magnétique dans la couronne par la polarisation de la raie Fe XIV.

2. Spectro-polarimétrie-imagerie en ondes radioélectriques : FASR

La sensibilité des émissions thermiques de la couronne en ondes radioélectriques (rayonnement de freinage, rayonnement gyro-résonnant) au champ magnétique donne trois outils de mesure des champs dans la couronne en ondes centimétriques: la mesure des champs intenses au-dessus des taches solaires, par le rayonnement gyro-résonnant, la mesure de la composante longitudinale du champ magnétique dans les régions actives et les protubérances au travers de la polarisation circulaire du rayonnement de freinage et la mesure du champ transverse au-dessus des régions actives par l'inversion de la polarisation. Ces techniques ont été expérimentées avec des interféromètres et grands télescopes à certaines fréquences. FASR, grâce à sa capacité de spectro-imagerie et polarimétrie sur une grande gamme de fréquences, ouvrira la voie vers une exploitation systématique de ces outils.

3. Polarimétrie UV depuis l'espace :

Les techniques radioastronomiques et les coronographes au sol utilisant l'effet Zeeman trouveront leurs limites dans la résolution spatiale et, aussi pour les coronographes, dans l'élargissement intrinsèque des raies dû aux températures élevées. Il faut donc développer d'autres techniques pour mesurer le champ magnétique coronal. La plus prometteuse pour mesurer les champs magnétiques dans la région de transition et la couronne semble aujourd'hui la polarimétrie UV, où le champ magnétique est mesuré par effet Hanle. Les premières mesures spatiales datent des années 1970. La faisabilité technique de mesures polarimétriques par satellites a été montrée aussi bien dans différentes raies (notamment Ly α , Si IV, OVI) avec les satellites Intercosmos, OSO 8, SMM et SOHO. Cependant aucun équipement de polarimétrie UV ne sera embarqué sur les prochains satellites solaires (Solar B, SDO et Solar Orbiter).

Il est donc important de développer des stratégies pour les missions actuellement en projet. Du côté réalisation, des possibilités existent de développer des multicouches permettant –sur le papier- des mesures raisonnables de la polarisation. Les cibles de telles mesures comprendront tout objet dans la couronne diffusant à 90° (protubérances, couronne, ...) et tout objet sur le disque diffusant à 0° (filaments). Un groupe de travail qui se met actuellement en place examine les possibilités de telles mesures sur des missions du type SMESE. Il sera sans doute amené à élargir rapidement son horizon et travailler, avec d'autres collègues européens, à une mission polarimétrique solaire –dédiée ou non- dans le cadre Cosmic Vision.

II. Magnétisme solaire et stellaire et structure interne

A. Héliosismologie, magnétisme solaire et structure interne

Les analyses des données SOHO couplées aux progrès de modélisation de la sphère solaire (incluant des nouvelles données de Physique atomique), ont permis des avancées significatives dans la connaissance de la structure interne. La vitesse du son est maintenant connue avec une précision meilleure que 10^{-3} jusqu'à environ 0.1 Rayon solaire (R_{\odot}). Par contre, le profil de la densité de matière est encore très affecté par une résolution spatiale insuffisante. La rotation interne est à présent estimée jusqu'à environ 0.15 R_{\odot} . Dans les couches les plus profondes, la valeur de la rotation, de même que la direction de son axe, restent à découvrir, ce qui passe par la détection des modes de gravité.

La tachocline, couche de transition entre la zone convective et la zone radiative, est un centre d'intérêt particulier, puisqu'elle joue très probablement un rôle essentiel dans la génération du cycle magnétique solaire. Pourquoi son épaisseur est-elle si faible (environ 0.05 R_{\odot}), quelles sont ses propriétés structurelles et dynamiques, autant de questions dont les réponses nécessitent une connaissance plus approfondie de toute la sphère solaire. En particulier grâce au développement de moyens de calcul de plus en plus puissants, de gros progrès ont été réalisés ces dernières années dans la modélisation de la zone radiative et de la tachocline. Les observations doivent suivre pour discriminer les divers scénarios envisagés dans les modèles. Par exemple, existe-t-il un champ magnétique fossile en profondeur, ou encore, quelle(s) topologie(s) possède le champ magnétique dans les différentes zones ? Il s'agit bien sûr de gagner en résolution spatiale (en profondeur et en latitude), que ce soit au niveau de la dynamique ou au niveau du magnétisme. Concrètement, cela se traduit par la détection de modes propres supplémentaires, qui véhiculent des informations indépendantes sur des couches de plus en plus fines.

L'information sur la rotation et le champ magnétique est très pauvre vers les pôles, alors qu'il est possible que les pôles jouent un rôle important et pas encore compris. Seules des observations hors de l'écliptique, comme prévues depuis Solar Orbiter, peuvent contribuer à ces questions.

L'amélioration des performances en héliosismologie peut se réaliser soit en améliorant le rapport signal/bruit d'expériences fondées sur un concept éprouvé, soit en explorant de nouvelles méthodes. Pour les basses fréquences, où l'on espère notamment détecter les modes de gravité, des techniques de réduction du bruit d'origine solaire sont en cours d'étude pour un spectromètre à résonance de type GOLF (Nouvelle Génération). L'utilisation de techniques d'analyse "temps-distance", initialement utilisées en géophysique, permet d'avoir accès à de nouvelles informations sur les structures de la zone convective et de la tachocline. Ces techniques ont encore une grande marge de progression devant elles. Plus ambitieuses, des observations simultanées du soleil à partir de 2 points significativement éloignés, permettraient une analyse "temps-distance" avec une base particulièrement grande, ce qui rendrait possible le sondage des couches profondes par une méthode "directe".

A l'heure actuelle, pour contribuer partiellement à ces objectifs, les seules missions spatiales en cours de réalisation sont PICARD et SDO (Solar Dynamics Observatory), avec Solar Orbiter en perspective.

Notons ici que la mission SDO (et plus tard la mission Solar Orbiter) permettra, par la technique de sismologie locale, d'approfondir les résultats déjà obtenus sur la génération (dynamo locale) du champ magnétique en-dessous des régions actives, une thématique littéralement sous-jacente à celle des mécanismes d'instabilité et d'hélicité magnétique (cf. par exemple modèle subphotosphérique d'émergence de tube flux avec flot vertical non uniforme (Amari , Aly , Luciani 2004)) et même à la production des éruptions.

B. Magnétisme, convection et supergranulation solaire

Il est difficile de séparer la problématique de la granulation et de la supergranulation (constituant de base du « soleil calme ») de celle du champ magnétique. L'étude de la dynamique, y compris le rôle des granules explosifs et les variations au cours du cycle, nécessitent un grand échantillonnage et donc un grand champ, capacités instrumentales offertes par CALAS. On peut penser que la combinaison d'imagerie (CALAS) et magnétographie (SDO) à grand champ (et haute résolution spatiale) permettront de comprendre l'émergence du champ magnétique « calme », ses diverses échelles et son expansion dynamique dans la photosphère – chromosphère.

L'archivage à BASS2000 de l'énorme quantité de données ainsi produites ainsi que la présence sur place d'une grande expertise en traitement du signal et en modélisation sera un grand atout pour leur exploitation.

C. Magnétisme et activité stellaires

-Thèmes scientifiques :

Grâce à ESPADONS, il sera possible de défricher de nouveaux territoires : par exemple l'étude détaillée (par l'analyse individuelle des signatures Zeeman des raies atomiques et moléculaires) du magnétisme d'étoiles peu actives et assez similaires au Soleil (en étroite collaboration avec les physiciens solaires), ainsi que celle des étoiles complètement convectives dont l'intense activité reste énigmatique et pour lesquelles l'expertise des physiciens MHD sera très utile.

Mentionnons aussi l'étude du magnétisme des étoiles jeunes (étoiles T Tauri et de Herbig) et son impact sur l'évolution stellaire vers la séquence principale. L'étude des étoiles chaudes, et notamment la compréhension du rôle du champ magnétique dans le phénomène Be (présence d'un disque d'excrétion circumstellaire) est également un défi important qu'il est aujourd'hui possible de relever.

L'étude du magnétisme des disques d'accrétion protostellaires ne fait que débiter : si les modèles de disques d'accrétion invoquent tous l'existence d'un champ magnétique pour expliquer la présence de jets très collimatés et orientés perpendiculairement à la surface du disque, quasiment aucune contrainte observationnelle n'existe aujourd'hui pour valider (ou invalider) les mécanismes physiques proposés par ces modèles.

La grande disponibilité de NARVAL au TBL permet d'envisager des études longues (plusieurs mois) portant sur l'activité magnétique des étoiles en suivant l'évolution de la distribution de surface des taches sombres et des régions magnétiques, et en déduire, non plus seulement la rotation différentielle de surface, mais aussi peut-être la circulation méridienne, et estimer la durée de vie des taches en suivant en continu leurs apparitions et disparitions à la surface..

-Instruments nouveaux

Un spectropolarimètre échelle similaire à ESPaDOnS, mais fonctionnant dans le proche infrarouge (de 1 à 5 microns), permettrait de réaliser des études beaucoup plus fines du magnétisme des étoiles froides, qu'il s'agisse de la sensibilité au champ ou de l'observation des taches.

L'observation simultanée avec ESPaDOnS et NARVAL peut permettre d'observer les cibles en continu sur des durées de plusieurs mois mais la seule manière efficace de résoudre le problème consiste à réaliser les observations depuis le pôle Sud (dôme C). Un projet de spectropolarimètre optique (ou mieux IR) installé au dôme C est à l'étude, en collaboration avec les astérosismologues du PNPS, également intéressés par le suivi spectroscopique en continu des étoiles pulsantes de type solaire.

Il est également souhaitable de mettre rapidement sur pied une base de données de tous les spectres obtenus avec ESPaDOnS et NARVAL (et rétrospectivement MUSICOS), archivage que se propose de faire BASS2000.

Il conviendrait aussi de poursuivre la collaboration avec les physiciens du programme PNP sur la caractérisation de l'atmosphère des planètes extrasolaires par techniques polarimétriques.

Enfin, l'interférométrie en lumière polarisée pour l'étude des champs magnétiques stellaires reste une direction potentielle d'étude sous explorée. Si une tentative instrumentale sur ce sujet a été enclenchée depuis plusieurs années (l'expérience SPIN menée par les équipes de Nice et Grenoble), ce travail reste encore préliminaire et prospectif, et mérite d'être poursuivi.

Politique scientifique

Une meilleure communication entre les programmes nationaux concernés par cette thématique de recherche est souhaitée (comité interdisciplinaire ?, dont le rôle serait de sélectionner les programmes pluridisciplinaires les plus prometteurs). Afin d'accroître la communauté française et européenne en spectropolarimétrie stellaire, il convient d'organiser régulièrement des écoles d'été et d'amplifier l'enseignement spécifique dans ce domaine.

III. Magnétisme solaire : instabilités, éruptions, éjections de masse, particules de hautes énergies

A. Introduction :

Le couplage entre les régions sub-photosphériques et la basse couronne est à l'origine de tous les phénomènes qui caractérisent les événements rapides de l'activité solaire, tels que les *éruptions confinées*, le déclenchement des *éjections de masse coronales* (CMEs) et tous les effets énergétiques qui en résultent, notamment l'accélération des *particules énergétiques solaires*, parfois jusqu'à des vitesses relativistes, et l'*ouverture du champ magnétique* sur de grandes échelles, parfois transéquatoriales.

Ce couplage assure un *stockage lent*, sub-Alfvénique d'*énergie* et d'*hélicité magnétique* dans les structures de l'atmosphère solaire externe pendant des périodes allant de l'heure à la semaine (par exemple dans des sigmoïdes, au voisinage de forts gradients de connectivité du champ magnétique coronal). Ce couplage se manifeste par la génération au niveau de la photosphère et par le transport dans la couronne de *courants électriques étendus ou confinés* dans des nappes étroites. Ces courants, selon leur échelle de formation, engendrent directement des *forces de Lorentz* (donc de la dynamique à des échelles variées) et des *champs électriques* localement intenses (donc de l'accélération de particules) et indirectement des forces de pression (via le *chauffage* par effet Joule) et des *ondes MHD* (qui pourraient expliquer l'activation d'éruptions à distance et l'accélération du vent solaire). Tous ces effets s'accompagnent d'une *libération rapide d'énergie magnétique*, sur des temps typiquement Alfvéniques.

Tous les processus précédemment décrits font partie intégrante du déclenchement et du développement des CMEs. L'étude détaillée des processus tout d'abord de façon séparée puis à terme de façon couplée, devrait permettre d'*obtenir graduellement une vision plus quantitative* de l'origine solaire des nuages magnétiques interplanétaires et des événements à particules, qui sont tous deux à la source des plus puissantes perturbations dans les environnements ionisés de la Terre et des autres planètes.

La prospective de ce thème s'attache à étudier tous ces aspects, *tant du point de vue observationnel que théorique*. La diversité des échelles spatiales, temporelles, de température et d'altitude dans l'atmosphère solaire nécessitera le développement et l'utilisation d'une *instrumentation variée* (sol et espace, des ondes radio métriques jusqu'aux rayons X et gamma) et de *nombreux modèles* qui resteront à court terme probablement disjoints, du fait des différentes échelles/physiques qu'ils incorporent, mais qui pourront être néanmoins alimentés les uns par les autres (extrapolations du champ magnétique dans la couronne, calculs d'injection d'hélicité, simulations numériques de MHD globale ou d'accélération locale de particules). Ces points sont détaillés ci-dessous.

B. Mécanismes de stockage d'énergie et d'hélicité :

Les projets de ce sous-thème impliquent une forte participation dans l'*exploitation des instruments* qui observent les basses couches de l'atmosphère solaire, notamment les *magnétographes* photosphériques et les (spectro) *imageurs* chromosphériques et coronaux.

L'arrivée imminente pour 2006 de magnétogrammes vectoriels de routine mono longueur d'onde dans la photosphère avec le SOT de *Solar-B* (NASA/ISAS), les récentes preuves des potentialités du MTR de *THEMIS* pour obtenir ce type de données, en multi longueur d'onde, et à plus long terme les données de HMI sur *SDO* (NASA) nous permettront de mesurer directement, à quelques instants dans la vie des régions actives, les courants électriques dans la photosphère qui sont la trace des processus d'injection d'énergie et d'hélicité dans la couronne. Ces études nous permettront de préciser les rôles respectifs de l'émergence, du cisaillement et de la torsion.

L'utilisation parallèle de *magnétogrammes classiques* à haute résolution temporelle nous permettra non seulement d'identifier les sites d'injection graduelle d'hélicité magnétique, mais aussi de quantifier cette injection en utilisant les plus récentes théories pour sa mesure. Cette grandeur étant un invariant dans tous les processus MHD dans des plasmas faiblement dissipatifs (tels que ceux du Soleil), sa mesure permettra non seulement de faire le lien entre les champs magnétiques coronaux, ceux qui sont évacués dans le milieu interplanétaire (MIP) par les CMEs et ceux qui seront estimés dans le futur sous la photosphère par les observations d'héliosismologie temps-distance. La mesure de l'hélicité, qui est un domaine naissant dans la discipline, permettra aussi de mieux contraindre les futurs modèles de CMEs, les modèles actuels n'étant toujours pas à même de les déclencher sans faire intervenir des effets qui sont peut-être artificiels, ou du moins pas encore justifiés.

Aussi riche soit-elle, l'exploitation des magnétogrammes devra impérativement être couplée à celle de nombreuses autres données, montrant la structuration et l'évolution des boucles, pour préciser l'origine dominante de l'injection d'énergie et d'hélicité. C'est dans ce cadre que seront utilisées les données d'instruments déjà en opération (e.g. le DPSM du *THEMIS*, du *VTT* et du *Pic du Midi* en H α , en Ca II et en Na D1, les spectro-imageurs UV et EUV EIT, CDS et SUMER de *SoHO* et de *TRACE*) mais aussi les futures données XUV de *Solar-B*, les observations stéréoscopiques de SECCHI sur *STEREO* (NASA), et plus tard les observations des expérience AIA sur *SDO* et LYOT sur SMESE, ainsi que les mesures des champs magnétiques dans la basse couronne avec *FASR*. Des instruments de surveillance comme le coronographe H α au Pic du Midi sont un appui nécessaire.

La mise en œuvre de ces travaux nécessitera de coordonner internationalement de nombreux instruments. Ces études permettront ainsi de mieux contraindre les modèles de champs magnétiques pré-éruptifs, notamment sur les questions de la quantité de torsion présente dans les protubérances, les taches δ et les sigmoïdes, et sur l'importance des mécanismes de reconnexion photosphérique dans les bombes d'Ellerman dans la cascade inverse d'hélicité conduisant à former des grandes structures torsadées dans la couronne.

La complexité et le niveau d'expertise requis dans la mise en œuvre de chacune de ces étapes observationnelles nécessitera de *consolider les couplages déjà existants avec des travaux théoriques*.

Les recherches théoriques devront continuer à se développer, premièrement de façon générique, afin de fournir des prédictions testables par les observations (approche du type modélisation directe), ces dernières apportant en retour des nouvelles contraintes. Nous modéliserons avec des *simulations MHD* la distribution de torsion dans des configurations multipolaires fermées, et l'effet de la diffusion au niveau de la photosphère dans le transfert d'hélicité à grande échelle dans la couronne. En parallèle, nous chercherons à inclure de façon réaliste le haut de la zone convective pour modéliser l'émergence de tubes de flux.

Par ailleurs, l'effort de modélisation coronale directement appliquée à des observations devra être poursuivi, puisqu'il a fait ses preuves au cours des dernières années. L'*extrapolation de magnétogrammes* dans des configurations sigmoïdales nous permettra de contraindre les modèles numériques en MHD. L'objectif sera de *joindre ces deux approches* en développant des interfaces entre les codes MHD récemment développés et les codes d'extrapolations plus anciens.

C. Particules énergétiques :

Les ions et électrons non thermiques contiennent une fraction significative du budget d'énergie d'une éruption. D'autre part, des éjections de masse rapides peuvent engendrer des ondes de choc qui sont également susceptibles d'accélérer des particules qui s'échappent dans l'espace interplanétaire. Tout un spectre de signatures de particules non thermiques est en fait trouvé en liaison avec l'activité solaire, allant des grandes éruptions à des événements dont le budget d'énergie est inférieur de plusieurs ordres de grandeur, montrant que des populations non thermiques de particules sont un ingrédient fondamental de la couronne et de l'espace interplanétaire, et sans doute d'autres environnements astrophysiques.

1. Particules de hautes énergies dans les éruptions solaires

La *spectro-imagerie en rayons X/gamma et ondes radio* fournit les diagnostics les plus directs des électrons et ions énergétiques qui interagissent avec l'atmosphère du Soleil. Plusieurs instruments opérationnels ont collecté dans les dernières années des données dont l'exploitation conjointe promet des progrès significatifs dans la localisation des régions d'accélération et la compréhension des processus à l'œuvre :

- L'imagerie X/gamma de RHESSI (NASA, CoI français) nous permet pour la première fois de distinguer les sites d'interaction des ions et des électrons lors des éruptions. Sa spectrographie, avec une résolution spectrale inégalée dans le domaine X/ γ , montre des détails des distributions en énergie des électrons, avec la possibilité de distinguer les composantes thermique et non thermique.

- Les premières observations des éruptions en ondes sub-millimétriques (« Solar Sub-millimeter Telescope » SST, brésilien ; instruments développés par l'Université de Berne pour le télescope KOSMA, Gornergrat) montrent le rayonnement synchrotron des électrons ultra relativistes, mais aussi d'autres composantes dont on ne sait pas encore si elles sont produites par le plasma thermique de la basse chromosphère, des produits de désagrégation nucléaire ou d'autres effets relativistes.

Ces données portent des informations inédites, leur exploitation doit se poursuivre sur plusieurs années. L'accompagnement par des instruments existants (imagerie radio, spectro-polarimétrie et imagerie des structures magnétiques) reste indispensable à l'exploitation de ces données. En parallèle aux études observationnelles, l'effort de modélisation de l'accélération des particules par des champs électriques super-Dreicer, qu'ils soient de nature SOC ou cinétiques sera poursuivi en tentant de faire le lien entre les aspects topologiques ou MHD des éruptions et les aspects microscopiques des processus d'accélération.

2. Processus dynamiques dans la couronne et événements à particules

L'origine des événements à particules dans l'espace interplanétaire reste un problème ouvert. La question à approfondir aujourd'hui et dans les années à venir est le *rôle respectif des ondes de choc et de la reconfiguration magnétique lors d'une éruption et en aval d'une éjection de*

masse dans l'accélération et le transport des particules. STEREO apportera à cette question deux types de diagnostics inédits, grâce aux observations bisatellitaires :

- la vue à la fois en latitude et en longitude des CME et de l'étendue des ondes de choc que les plus rapides d'entre elles engendrent

- l'exploration de la structure en longitude des flux de particules, avec une distance entre les satellites qui croîtra au fil des ans, et un troisième point de vue depuis des satellites au voisinage de la ligne Soleil-Terre.

Ce diagnostic doit être combiné avec l'observation des signatures d'accélération dans la couronne. Cela comprend des observations en rayons X durs et gamma (RHESSI) et l'imagerie en ondes radio (RH de Nançay) qui permet d'identifier des sites d'accélération de particules dans la moyenne couronne, là où le plasma est trop dilué pour que les particules puissent émettre des rayons X ou gamma détectables.

3. Micro-éruptions, orages de bruit et structure magnétique de la couronne

La faible activité solaire attendue dans les 3 à 4 années à venir nous permettra à nouveau d'étudier dans quelle mesure des processus d'accélération de particules jouent un rôle dans l'atmosphère quiescente du Soleil.

Les observations de RHESSI aux énergies autour d'une dizaine de keV sont une première en spectro-imagerie X. Elles suggèrent qu'un fond d'activité et de production d'électrons non thermiques existe quasiment en permanence dans les régions actives, en dehors des éruptions majeures. D'autre part, les orages de bruit en ondes décimétriques et métriques nous montrent depuis longtemps que des électrons sont accélérés dans les régions actives sur de longues durées (plusieurs jours). Dans la plus haute couronne et le milieu interplanétaire, les sursauts de type III décamétrique à kilométrique révèlent des faisceaux d'électrons. Il est plausible que tous ces processus soient physiquement liés, mais nous avons maintenant pour la première fois la possibilité de combiner les observations et mesures depuis la chromosphère (rayons X) à 1 UA (ondes kilométriques), et d'y adjoindre des mesures sensibles d'électrons et d'ions depuis l'espace, grâce à STEREO. Le développement des techniques de mesure des champs magnétiques et leur extrapolation dans la couronne complètent une nouvelle branche d'investigation d'un type d'activité à la charnière entre éruptions et chauffage de la couronne.

D. Sites de libération d'énergie et d'ouverture du champ :

L'étude couplée entre les processus locaux (e.g. accélération de particules) et globaux (topologie du champ magnétique coronal et instabilités MHD) de libération d'énergie pourra être effectuée en combinant les approches décrites ci-dessus, par l'étude d'événements observés dans la couronne solaire.

Alors que les observations radio/X/gamma et les modèles d'accélération apporteront, notamment via les spectres en énergie, des informations quantitatives sur les processus d'accélération locale de particules dans la couronne, les observations dans différentes gammes de température et les modèles MHD à plus grande échelle apporteront des nouvelles contraintes sur les énergies et les topologies magnétiques qui conditionnent la formation des sites d'accélération.

Plus précisément, l'évolution dynamique des *rubans d'éruption* chromosphérique observés en H alpha et en EUV et celle des *centroïdes d'émission* X/gamma le long de ces rubans devra

être comparée aux *diverses classes de topologies* complexes pour le champ magnétique déduites des *extrapolations* (e.g. point nuls et séparateurs avec séparatrice, tube de flux hyperbolique avec quasi-séparatrice), dans des événements confinés comme éruptifs. La *simulation MHD* des changements de connectivités abruptes ou glissantes associés à ces topologies, sera un indicateur clef pour interpréter l'évolution des structures observées et pour identifier les sites d'accélération de particules, dans le cadre d'une géométrie à grande échelle impossible à traiter de façon auto-cohérente dans une même modélisation.

L'avènement de *FASR* et de *SDO*, avec leurs très larges couvertures spectrales en radio et en UV respectivement, permettra pour la première fois d'observer simultanément les sites d'accélération coronaux, avec les particules descendantes vers les rubans d'éruption et celle montantes vers le MIP, tout en pouvant imager les structures coronales associées.

Le succès de ces études ambitieuses au niveau de la couronne solaire nécessitera la mise en commun de toutes les expertises présentes dans les équipes solaires de la communauté PNST.

E. L'instrumentation du futur:

Ces programmes de recherche débouchent directement sur le concept de nouveaux instruments qui doivent être portés à maturité dans les années à venir :

- Le projet de radiohéliographe *FASR* (Frequency Agile Solar Radiotelescope), auquel les équipes françaises participent pour des études de R&D et souhaitent participer pour l'exploitation scientifique. *FASR* fera des images de l'atmosphère solaire entre 0.1 et 30 GHz. Deux types inédits d'observations concernent directement ce programme de recherche : la première imagerie radio dans la gamme de fréquences couvrant les régions d'accélération des électrons lors des éruptions et la première cartographie des champs magnétiques dans la couronne active.

- Les recherches sur la relation entre éjections de masse et activité dans la basse couronne souffrent d'un manque de couverture de la basse couronne par les observations actuelles. Les coronographes de *STEREO* ne couvrent pas ces couches-là et *SDO* n'aura pas de coronographe. L'expérience *LYOT* sur le projet de micro-satellite franco-chinois *SMESE* (horizon 2011-12) vise l'imagerie du disque et la coronographie dans la raie Lyman alpha de l'hydrogène, moyen de tracer les configurations magnétiques et de relier les processus dynamiques dans la couronne aux couches sous-jacentes.

- Les observations sub-millimétriques ont entrouvert une nouvelle fenêtre d'observation sur les électrons les plus énergétiques accélérés lors des éruptions et les processus thermiques et nucléaires dans la basse atmosphère solaire. Le télescope *DESIR* sur *SMESE* vise à ouvrir une nouvelle fenêtre spectrale en obtenant les premières observations du Soleil en infra rouge lointain (e.g., 2 et 9 THz), en combinaison avec la spectrographie gamma aux plus hautes énergies jamais accessibles aux observations solaires dédiées.

- A plus long terme les mesures de neutrons d'origine solaire de basse énergie (qq MeV) non mesurables à 1AU qui pourraient être effectuées à bord de *Solar Orbiter* (ou des *Sentinels*) ouvriront une fenêtre nouvelle d'observations de l'activité solaire, en permettant de diagnostiquer pour de nombreuses éruptions des protons de basse énergie pouvant contenir une grande partie de l'énergie libérée dans les éruptions.

IV. Chauffage de la couronne et formation du vent solaire

A. Perspectives théoriques et de modélisation

Les perspectives, à moyen terme, concernant le problème du chauffage coronal, passent par des simulations globales depuis les processus physiques de base, jusqu'à leurs conséquences observables, permettant ainsi la comparaison directe entre les modèles numériques et les observations. Dans un premier temps, cela pourra se faire en couplant les modèles qui sont déjà à disposition au sein de la communauté PNST et grâce aux collaborations internationales développées par la communauté PNST: extrapolations de champ magnétique, modèles de dissipation d'énergie par la turbulence, thermodynamique coronale, physique du rayonnement EUV. La plupart du temps, les modèles physiques qui sont développés reposent sur des équations aux dérivées partielles non-linéaires qui sont résolues par intégration numérique. Dans le cas du problème du chauffage coronal, il est nécessaire à la fois de calculer très longtemps pour générer de nombreux événements en vue d'une étude statistique, et d'avoir une résolution spatiale élevée afin de bénéficier d'une large gamme d'échelle spatiale nécessaire dans la description turbulente du fluide. La difficulté à combiner ces deux facteurs limite l'utilisation de nos modèles. Afin de remédier à cela, plusieurs solutions sont possibles comme celle consistant à développer des codes numériques avec une grille de points non-uniforme. Par exemple, une idée originale développée en collaboration avec le NCAR à Boulder, consiste à incorporer dans un code spectral une grille de points non-uniforme en mouvement. La difficulté repose sur le fait que les codes spectraux ont besoin d'une grille de points uniforme pour utiliser des algorithmes de transformation de Fourier rapide. En traitant le problème en coordonnées Lagrangiennes, il est alors possible de conserver l'uniformité spatiale de la grille tout en concentrant, en coordonnées Eulériennes, les points de grille sur les petites échelles générées par les structures.

Concernant **les approches cinétiques** pour étudier le chauffage coronal, de nouveaux types de modèle, dit N-Corps, sont en développement. Ces modèles sont largement utilisés dans les études de la dynamique gravitationnelle des étoiles au sein d'une galaxie. Leur principe est de considérer directement chaque particule et de calculer son mouvement dans le champ électrostatique cumulé des autres particules du plasma. Ce principe est tout à fait nouveau dans ce domaine car habituellement, on préfère écrire les équations pour des quantités macroscopiques tels que la densité locale (MHD) ou la fonction de distribution de vitesse des particules (Fokker-Planck). En fait, l'approche N-Corps est la plus simple et la plus intuitive physiquement car il n'y a aucune hypothèse sous-jacente (équilibre thermodynamique pour la MHD, collisions proches rares pour Fokker-Planck ...). La faculté de ce nouveau type de code à s'adapter à tout type de plasma devrait pouvoir permettre de l'appliquer aux problèmes du vent solaire et du chauffage de la couronne.

Concernant **les modèles exosphériques du vent solaire**, une amélioration naturelle consiste à s'approcher du cas plus réaliste dans lequel l'exobase ne constitue plus une rupture abrupte entre une barosphère collisionnelle et une exosphère non collisionnelle. Pour cela, il faut supposer plusieurs exobases à des distances différentes pour tenir compte de la variation du libre parcours des particules avec leur vitesse. Par ailleurs, le problème du vent solaire, étant directement lié à celui du chauffage de la couronne, la suite naturelle des modèles exosphériques du vent solaire est d'implémenter une théorie tenant compte des mêmes mécanismes pour expliquer à la fois les températures élevées de la couronne et l'accélération du vent rapide. Ce mécanisme pourrait être celui du « filtrage des vitesses » proposé par Scudder (1992) pour expliquer le chauffage de la couronne.

B. Perspectives concernant les moyens observationnels.

De nombreuses questions concernant le chauffage coronal et la formation du vent solaire sont encore d'actualité, comme par exemple l'étude, même macroscopique, du couplage entre mouvements de matière et champs magnétique ou bien l'interface couronne – vent solaire où intervient le changement de nature du plasma collisionnel/non-collisionnel. Il est donc important de poursuivre le patient travail d'identification, de caractérisation et de modélisation des milieux où opèrent chauffage, accélération et éjection de matière. Il s'agit, par exemple, d'améliorer les diagnostics en augmentant, si possible par un ordre de grandeur, les résolutions spatiale, spectrale, temporelle. Cela ne peut se faire que par des missions résolument nouvelles consistant, par exemple, à se rapprocher du Soleil. Ces missions posent des problèmes inédits en instrumentation, liés notamment à l'entrée dans l'optique d'une charge radiative élevée, qu'il faut résoudre dans le cadre de R et D où les tests dans l'EUV et X jouent un rôle déterminant. L'approche multi-longueurs d'onde est essentielle. Prenons l'exemple simple du chauffage coronal : il s'agit d'identifier le ou les processus-clés de chauffage, mais il est tout aussi critique de connaître le plasma pré et post-chauffage. Un événement de chauffage élémentaire passe ainsi par une très large gamme de températures qui nécessite une imagerie, une spectrographie (et quelquefois une coronographie) multi-longueurs d'onde. La construction de statistiques est essentielle car elle permet de faire des comparaisons directes avec un des modèles parmi les plus populaires actuellement, à savoir le modèle de chauffage par « nano-éruptions » de Parker. Ceci nécessite l'exploitation de données diverses permettant de détecter les « nano-éruptions » ou les événements transitoires dans le réseau chromosphérique observés en rayons X et en ondes radio centimétriques (données de RHESSI, UV de SOHO et à moyen terme observations à haute sensibilité, résolution spectrale de FASR).

En ce qui concerne les missions spatiales de physique coronale du vent solaire et des relations Soleil-Terre, les perspectives à court terme sont limitées aux projets préparés par la NASA. Il s'agit d'instrumentations le plus souvent dérivées de SOHO, mais bénéficiant d'un nombre accru de pixels spatiaux et spectraux et sur des orbites dédiées à la vision stéréoscopique (STEREO) ou d'un débit élevé de télémétrie (Solar Dynamics Observatory ou SDO, sur orbite géostationnaire). A plus long terme, la mission Solar Orbiter de l'ESA, permettra de s'approcher du Soleil, faire des observations en co-rotation et faire de l'imagerie coronale hors écliptique

La mission STEREO est un jeu de 2 satellites multi-instruments qui observeront le Soleil sous deux angles différents, à partir de 2006, permettant ainsi une vue 3D des structures coronales. Le lancement de STEREO est prévu en avril 2005. L'implication de la communauté PNST est importante sur ce projet : laboratoire PI de l'instrument ondes et radio S/Waves (récepteur radio entre 2.5 kHz et 16 MHz), chercheurs de quatre laboratoires co-Investigateurs ou scientifiques associés sur l'instrument SECCHI, miroir des données SECCHI implanté à MEDOC et labo Co-I impliqué sur l'instrument IMPACT qui mesurera les électrons du vent solaire et les particules énergétiques. Pour finir, il est également prévu que le CDPP joue un rôle actif concernant la coordination scientifique et la diffusion des données autour de STEREO.

SDO est un satellite NASA à participation internationale, multi instruments et multi longueurs d'onde, à très haute cadence temporelle (<10 s) prévu pour 2007. Ses objectifs scientifiques relèvent des relations Soleil-Terre et portent notamment (mais pas uniquement) sur l'observation continue des CME. Son volume de données sera 1000 fois supérieur à celui de SOHO. Son magnétographe permettra de faire de l'héliosismologie locale. Une partie de la

communauté solaire est impliquée dans cette mission, notamment au niveau analyse des données des imageurs AIA.

La mission Solar Orbiter de l'ESA, prévue pour 2013 (ou au-delà), offre la possibilité d'explorer de manière rapprochée les régions équatoriales et polaires du Soleil. Il s'agit ici de combiner mesures in-situ et remote sensing à quelques dizaines de rayons solaires au-dessus de la surface, de sortir du plan de l'écliptique et de tourner pendant quelques semaines en synchronisme avec le Soleil. Les objectifs scientifiques sont ambitieux (ils incluent même de la sismologie locale), mais bénéficient d'une orbitographie très favorable. L'instrumentation est, elle aussi, très ambitieuse et doit faire face à des contraintes sévères de masse, d'environnement et de télémétrie. De nombreuses équipes liées au PNST sont fortement intéressées par cette mission et sont en partie déjà impliquées dans des consortiums de fourniture d'instruments scientifiques pour cette mission. Parallèlement et peut-être en collaboration avec Solar Orbiter, la NASA étudie, dans le cadre International Living With a Star, un projet de **Sentinelles**, dont le but est l'étude multi-satellites des phénomènes transitoires (CME, éruptions, accélération de particules) de l'héliosphère interne.

Entre SDO et SO, la communauté française ressent le besoin de missions intermédiaires du type **SMESE** portant sur des objectifs bien précis comme la connaissance des phénomènes éruptifs dans une large gamme de longueurs d'onde. Par ailleurs, la communauté solaire a noté le potentiel d'investigation de la couronne très interne, offert par un Vol en Formation où un premier satellite sert d'occulteur externe pour le coronographe situé sur un deuxième satellite (propositions ASPICS et ASPICS2).

A plus long terme, la communauté PNST a déjà exprimé, à plusieurs reprises, son intérêt pour un projet de **Sonde Solaire**, qui visitera pour la première fois la couronne solaire in-situ.

Pour finir et avant l'avènement de ces nouveaux projets instrumentaux, notons que la communauté PNST pourra continuer de bénéficier des moyens observationnels de missions telles que SOHO, Ulysse ou bien WIND. Ainsi les observations d'Ulysse en 2007-2008 au cours de sa troisième orbite autour du soleil en minimum solaire permettra la détermination du gradient de température dans le vent rapide et la comparaison aux précédents résultats obtenus au minimum. L'étude de la pression cinétique et du flux de masse en fonction du cycle solaire ainsi que de la structure 3D de l'héliosphère pourra également être affinée.

V. Interactions vent solaire - magnétosphère - ionosphère

La communauté PNST impliquée dans cette thématique a un fort engagement instrumental dans la détection des ondes et particules dans la magnétosphère terrestre et également dans les magnétosphères planétaires. Elle participe et s'engage sur des missions « phares » relevant des thématiques du PNST, que ce soit à l'ESA: CLUSTER, Double Star, BepiColombo ; à la NASA : Polar, Thémis, CASSINI-HUYGENS; et au CNES : Demeter, Taranis. Au sol, elle participe à des moyens internationaux comme les radars EISCAT-ESR et SuperDarn qui sondent l'ionosphère terrestre. Les développements de logiciels de mise à disposition et d'archivage des données sont des priorités de la communauté qui se traduisent dans les orientations futures de Centre de Données de la Physique des Plasmas (CDPP).

Cette activité expérimentale s'accompagne de modélisation et de simulations numériques concernant les frontières de plasma issues de l'interaction de l'environnement terrestre avec le vent solaire (choc terrestre, magnétopause, ...), la physique des interactions magnétosphères / ionosphère, la physique non linéaire (chaos et turbulence), la physique des plasmas. Une activité de modélisation des performances instrumentales (optiques électromagnétiques et interactions particules/matière) est également présente dans la communauté.

A. Objectifs scientifiques

Les travaux qui seront entrepris dans les années à venir s'organisent autour de deux axes principaux:

1. Les frontières et interfaces de la magnétosphère terrestre avec le vent solaire

Le premier obstacle que franchit le vent solaire lorsqu'il pénètre dans l'environnement de la Terre est le choc d'étrave. La stabilité de celui-ci est encore très mal comprise et beaucoup d'inconnues demeurent. Nous nous attacherons à mieux en élucider la structure en champs électromagnétiques et en particules, notamment lorsque sa géométrie par rapport à la direction du champ magnétique interplanétaire le fait passer d'une situation de choc quasi-parallèle à celle de choc quasi-perpendiculaire. Nous étudierons également les processus de thermalisation et réflexion au voisinage des chocs, les mécanismes de dissipation et aussi de reformation. Enfin, la présence de filaments magnétiques localisés en aval des chocs quasi-perpendiculaires apparaît comme un élément important qui remet en question le scénario admis pour la relaxation de l'anisotropie de température des protons. La compréhension de ce phénomène passe par l'observation d'un grand nombre de chocs et la simulation numérique.

En aval du choc, dans la magnétogaine, le comportement du plasma d'origine devient turbulent. La mise en évidence d'un fort effet Doppler sur les fluctuations électriques et magnétiques implique que les vecteurs d'onde de la turbulence sont essentiellement perpendiculaires au champ magnétique B à des échelles autour de l'épaisseur de peau des électrons, et sont parallèles à B à des échelles proches de la longueur de Debye. Ces observations devraient permettre de progresser dans l'étude des échelles et des mécanismes de dissipation de la turbulence.

Ensuite vient l'étude de la magnétopause. La mission CLUSTER renouvelle profondément notre connaissance de cette frontière en ce qui concerne les conditions du plasma qui prévalent des deux côtés de cette interface. Un domaine d'étude capital sur lequel nous mettrons l'accent est l'étude de sa perméabilité au plasma, qui prend place au travers de

processus de reconnexion magnétique. Plusieurs mécanismes ont été proposés et sont en débat. Nous mettrons l'accent sur la micro-reconnexion, notion nouvelle associée à la turbulence de la magnétogaine, et aux processus déjà très élaborés d' « événements à transfert de flux ».

Le rôle particulier des cornets polaires dans la pénétration du plasma de la magnétogaine vers la magnétosphère apparaît de plus en plus clair depuis la mission Interball, aujourd'hui terminée, et surtout avec la mission CLUSTER. Les cornets polaires sont des régions de la magnétosphère diurne dont les lignes de champ magnétique connectées à l'ionosphère polaire peuvent s'ouvrir sur le milieu interplanétaire. On y observe des injections de plasma de la magnétogaine, des échappements de plasma magnétosphérique, des émissions d'ondes, de la turbulence électromagnétique. Nous étudierons leur structure et dynamique, et, parmi les divers processus non-linéaires dont ils sont le siège, nous nous attacherons à la filamentation de l'énergie à l'intérieur de structures non-linéaires très localisées.

2. Le couplage des plasmas de la queue magnétosphérique et de l'ionosphère aurorale

La queue magnétosphérique est un immense réservoir où sont stockées de grosses quantités d'énergie sous deux formes : l'énergie magnétique et l'énergie particulaire. Ces deux formes d'énergie s'échangent en permanence au sein d'un gigantesque système qui couple les plasmas de la queue magnétosphérique avec l'ionosphère aurorale et polaire au pied des mêmes lignes de champ magnétique.

D'une part, cette énergie s'accumule : outre la pénétration de particules d'origine solaire, d'importants transferts de masse, depuis l'ionosphère aurorale et polaire vers la magnétosphère, ont été mis en évidence sous la forme d'échappement le long des lignes de force. Beaucoup d'inconnues demeurent dans les mécanismes d'accélération des particules parallèlement au champ magnétique et nous proposons de développer les travaux entrepris sur les sources et le transport du plasma froid dans la magnétosphère.

D'autre part, elle se relâche dans les deux directions, vers la Terre (magnétosphère interne et ionosphère aurorale) et vers l'espace interplanétaire, lors d'événements explosifs : les sous-orages magnétosphériques. Nous nous proposons d'étudier la structure et la dynamique des couches de courant, dans l'objectif d'élucider la question du lieu et de la nature des mécanismes de déclenchement des sous-orages.

Au sol, les radars assurent une couverture temporelle continue sur de vastes régions de l'ionosphère aurorale et polaire. Ces régions sont connectées magnétiquement à la magnétosphère externe, lieu d'impact privilégié des stimuli provenant du milieu interplanétaire et que des missions multi-satellites - actuellement Cluster, puis THEMIS et à terme MMS - se proposent d'étudier de manière concertée. Qu'il s'agisse de la fermeture des courants magnétosphériques à diverses échelles transverses, des transferts de plasma sous forme d'échappement ou de précipitations et des effets optiques associés ou encore de la projection plus ou moins parfaite du champ électrique magnétosphérique, l'ionosphère en est à la fois le réceptacle et un élément actif de contrôle. Chaque événement magnétosphérique possède sa signature ionosphérique que les instruments sol sont à même de mesurer. De par leur nature ceux-ci permettent de replacer les mesures obligatoirement (multi) ponctuelles que réalisent les satellites dans leur contexte spatio-temporel.

B. Moyens mis en œuvre

Ces projets scientifiques s'appuieront en premier lieu sur la poursuite de l'exploitation des instruments actuellement disponibles:

-missions spatiales en phase opérationnelle : des missions de l'ESA, CLUSTER (pour lequel une prolongation jusqu'en 2009 est obtenue) et DOUBLE STAR dont les 2 sondes ont été lancées en 2003 et 2004 ainsi qu'une sonde de la NASA, POLAR. Les communautés PNST de quatre laboratoires étant PIs et CoIs de plusieurs expériences de mesure des ondes et des particules, les observations de CLUSTER et DOUBLE STAR sont actuellement à la base de la plupart de nos travaux dans ces domaines. Ce dispositif CLUSTER - DOUBLE STAR préfigure les projets multi-satellites et multi-échelles à venir.

-au sol : le réseau SuperDARN et les radars EISCAT-ESR opérationnels dans leur configuration actuelle et pour lesquels de nouvelles installations sont prévues. Ces travaux se font en lien étroit avec le CDPP (Centre de Données de la Physique de Plasma) dont la partie scientifique est hébergée au CESR.

L'exploration de la magnétosphère terrestre se poursuivra avec de nouvelles missions multi-satellites :

-THEMIS (Time History of Events and Macroscale Interactions during Substorms) : projet de la NASA qui sera lancé fin 2006. Il est dédié principalement à l'étude à "grande échelle" des sous-orages et est constitué de cinq sondes identiques en orbite équatoriale et dont les apogées sont réparties radialement : 3 sondes dans la queue proche ($10 R_T$) et espacées de $2 R_T$, une sonde vers $20 R_T$ et la dernière vers $30 R_T$. Une partie de la communauté PNST de cette thématique est impliquée dans la mesure des fluctuations magnétiques de 0,1 Hz à 4 kHz.

-MMS (Magnetospheric Multi-Scale): Il s'agit d'un projet de la NASA qui s'inspire directement du concept de CLUSTER (4 satellites). Cependant l'objectif est cette fois de déterminer la nature du mécanisme de dissipation qui conditionne la reconnexion magnétique. Pour y parvenir le projet met en jeu (i) des échelles spatiales plus faibles, 10 à 200 km, (ii) des résolutions temporelles 10 à 100 fois meilleures, pour les instruments particules, (iii) une mesure tri-axe du champ électrique, ce qui permet de mesurer le champ électrique parallèle, et (iv) une orbite équatoriale. Une partie de la communauté PNST participe en fournissant les antennes pour la mesure des ondes magnétiques. Le lancement de MMS est prévu en 2012-2013.

-**CROSS-SCALE** : au-delà de ses capacités d'analyse tridimensionnelle des structures clefs de la magnétosphère terrestre, le projet Cluster a permis d'explorer différentes échelles grâce à la possibilité de modifier dans le temps les distances de séparation entre satellites. Il a également mis en évidence l'interdépendance de ces différentes échelles et la nécessité de pouvoir les analyser simultanément. Il est clair que les projets post-Cluster doivent s'engager dans cette direction. La communauté PNST participe au groupe de définition du projet Cross-Scale qui sera proposé à l'Agence Spatiale Européenne en collaboration avec l'agence spatiale Japonaise ISAS, dans le cadre du programme Cosmic Vision. Cross-Scale reposera sur une flottille de 8 à 12 satellites qui étudieront les régions clefs de la magnétosphère, queue, magnétopause, choc, à 3 échelles caractéristiques, typiquement ~ 10 km, quelques centaines de km et quelques milliers de km. Il sera donc possible d'analyser la chaîne complète de processus, entre l'échelle d'injection de l'énergie et celle de sa dissipation.

A plus long terme, la compréhension des phénomènes d'accélération en région aurorale passe par la détermination expérimentale des échelles spatio-temporelles caractéristiques de ces phénomènes, détermination qui requiert plusieurs points de mesure à l'instar des observations de CLUSTER dans la magnétosphère lointaine. Les processus physiques à l'œuvre en zone aurorale nécessitent en outre la mesure simultanée d'une diversité d'échelles spatiales parallèles et/ou perpendiculaires dynamiquement couplées entre elles. Ceci nous a amené à proposer au CNES, dans le cadre de son Appel à Idées 2004, le concept **IMEDIA** (Investigation Multi-Echelle De l'Interface Aurorale).

C. Activités théoriques et de simulation

Les réponses aux questions posées nécessitent aussi des investigations théoriques qui sont prévues à l'heure actuelle dans les directions suivantes:

1. Simulations numériques du choc d'étrave et du préchoc

Trois axes principaux sont définis fondés sur des codes particuliers mono- et bi-dimensionnels actuellement utilisés :

- (i) Etude des différents mécanismes responsables de la turbulence qui se développe au niveau du front de choc, responsable de l'accélération de particules jusqu'à des hautes énergies
- (ii) Impact des ions lourds sur le comportement non stationnaire du front de choc
- (iii) simulation auto-cohérente du choc courbe et du préchoc ionique. Une extension à des simulations particulières 3xD est aussi prévue prochainement.

2. Simulations numériques des échanges à travers la magnétopause

Le but est d'étudier les différents mécanismes qui peuvent expliquer les échanges "anormaux" à travers la frontière, et en particulier l'instabilité de Kelvin-Helmholtz. Dans un premier temps, ces simulations seront menées à l'aide de codes hybrides, puis avec un code cinétique 2D, qui permettent de reconstituer le comportement des particules, ainsi que les champs qu'elles induisent.

3. Développement des études sur la turbulence

Ce développement se fera dans un cadre théorique très nouveau – une formulation hamiltonienne des équations de la MHD-Hall. Il devrait fournir les lois de transfert des intégrales de mouvement du système sur les différentes échelles à comparer à celles obtenues expérimentalement. A terme, cette étude sera complétée par des simulations numériques, ceci afin de pallier la complexité "naturelle" des calculs non-linéaires qui ne permet pas en général d'obtenir des résultats analytiques exacts.

4. Etude des équations de fermeture du système d'équations fluides

Il apparaît nécessaire de développer des modèles d'un type nouveau qui décrivent de manière satisfaisante les deux échelles cinétique et MHD. La théorie cinétique montre que c'est au niveau des équations dites "d'état" ou "de fermeture" que se situe le point de jonction essentiel entre ces deux types de modèles. L'élaboration de nouvelles équations de fermeture et de leurs conditions de validité constituent donc un thème de recherche pour les années à venir. Des tests sur ces équations seront notamment réalisés à l'aide de simulations numériques.

5. Modélisation des sous-orages

La description du mouvement rapide des électrons le long du champ magnétique est fondamentale pour décrire les instabilités associées aux sous-orages. Deux voies sont poursuivies à l'aide de:

- (i) de simulations numériques (codes cinétiques) développées en optimisant les algorithmes (implicites),
- (ii) de modélisations analytiques reposant sur la résolution du système d'équations Vlasov/Maxwell linéarisées et devant être étendues au régime quasi-linéaire.

Par ailleurs, des simulations "globales" particulières 3D de la magnétosphère terrestre viennent de reproduire les structures de 'sashes' ("rubans" de champ magnétique à très faible amplitude) et 'cross-tail S' dans la queue magnétique obtenues précédemment uniquement avec des codes MHD. Ces travaux ouvrent la voie à des études auto-cohérentes 3D portant sur (i) les mécanismes déclencheurs de sous-orages suivant l'orientation du champ magnétique interplanétaire, et (ii) la reconnexion magnétique 3D dans la queue en utilisant la théorie de la topologie des champs.

6. Extension du modèle cinétique stationnaire 2D développé pour l'étude du chauffage transverse des ions dans la région du cornet polaire au côté nuit de la zone aurorale, et plus particulièrement aux régions de courant descendant.

7. Simulation numérique de la production de faisceaux d'électrons par une onde d'Alfvén au bord des cavités d'accélération aurorale à l'aide d'un code PIC 2D qui décrit la dynamique du centre guide des électrons et la dynamique complète des ions.

D. Comparaison avec les plasmas des magnétosphères planétaires

En marge des activités centrales du PNST, l'exploration des plasmas planétaires partage avec l'étude de l'environnement terrestre à la fois des préoccupations scientifiques communes et une instrumentation comparable souvent mises en oeuvre par les mêmes équipes. Les prochaines années seront marquées par deux projets d'envergure :

- l'analyse des observations de CASSINI-HUYGENS dans la magnétosphère géante de Saturne. Lancée en 1977, la sonde CASSINI-HUYGENS s'est mise en orbite autour de Saturne le 1^{er} Juillet 2004. Les objectifs affichés visent des sujets interdisciplinaires comme l'étude des sources, pertes et du transport du plasma magnétosphérique, l'étude des zones aurorales, l'étude des interactions ondes-particules. Des chercheurs de trois laboratoires participent aux expériences de mesure des plasmas et des ondes dans l'environnement de Saturne, ainsi qu'à une expérience embarquée sur la sonde de descente HUYGENS.

- la préparation de la mission Bepi Colombo vers la magnétosphère miniature de Mercure. Cette mission, identifiée comme « Pierre-Angulaire » du programme scientifique de l'ESA, est envisagée dans le cadre d'une coopération entre l'ESA et l'agence spatiale japonaise JAXA. Les petites échelles spatiales et temporelles de la magnétosphère Herméenne soulèvent de nombreuses questions sur sa structure à grande échelle, l'existence d'une couche de courant et la fermeture des courants, les interactions magnétosphère – exosphère – surface. Des chercheurs de trois laboratoires participent à la réalisation d'instruments sur le Mercury Magnetospheric Orbiter (MMO) de mesure des particules et des ondes.

Au-delà des caractéristiques spécifiques de ces deux environnements planétaires, ces observations fourniront des informations importantes sur les processus à l'oeuvre dans les plasmas spatiaux aux deux extrémités d'échelle.

L'étude des plasmas planétaires peut contribuer à l'émergence d'une nouvelle voie de recherche pour la magnétosphère terrestre. Ainsi, on a découvert dans les environnements des comètes que les émissions dans la gamme EUV/X, résultant de la capture par un ion de haut degré d'un électron appartenant initialement à un atome ou une molécule, affectent les observations astronomiques. Par exemple, l'émission héliosphérique (transfert de charges entre ions solaires et neutres interstellaires) est du même ordre que l'émission du gaz chaud interstellaire sur plus de 100 parsecs. De la même manière, toutes les exosphères émettent un rayonnement diffus consécutif à l'échange de charge entre les neutres planétaires et les ions de haut degré du vent solaire. Ces émissions sont également intéressantes à étudier pour elles-mêmes. Les travaux en cours sur les émissions X autour de Mars permettent de penser qu'avec des instruments performants, on pourra faire une tomographie des magnétosphères et des plasmasphères. L'émission terrestre (ions solaires, hydrogène exosphérique) peut contaminer les observations X faites à trop basse distance orbitale ou lorsque la magnétosphère est comprimée. On pourrait envisager une collaboration entre spécialistes de la magnétosphère et de ce type d'émission pour calculer l'émission terrestre, ce qui n'a été fait que par une équipe américaine à ce jour.

VI Processus Ionosphériques et Interactions avec l'Atmosphère

La prospective est organisée autour de trois questions, qui ne nous semblent pas avoir encore obtenu des réponses satisfaisantes et pour lesquelles la position privilégiée de l'ionosphère dans le système magnétosphérique est un atout à exploiter.

A. Les objectifs scientifiques

1. Quelle est la chaîne de processus qui assure la ligne de transmission depuis une émission à la surface du Soleil jusqu'à la dissipation dans l'atmosphère ?

Il est évident que les processus d'ensemble sont assez bien appréhendés. Néanmoins, on constate que la perception des mécanismes de couplages entre les différents domaines évolue sensiblement avec l'amélioration des performances instrumentales, et en particulier le rôle de l'ionosphère dans la dynamique globale est un point qui n'est pas encore compris. Pendant longtemps on a cantonné l'ionosphère à un rôle secondaire, censé n'assurer que la fermeture des systèmes de courant. Depuis que les petites échelles temporelles et spatiales sont accessibles, on a constaté que le milieu ionosphérique a un potentiel de réaction très important, qui peut intervenir aussi bien au niveau des ondes, que des particules, ou de l'électrodynamique. De gros efforts sont actuellement portés côté magnétosphère sur l'étude des petites structures et de leur impact sur les grandes échelles. Ces structures ont leur équivalent dans l'ionosphère, avec une dynamique très importante liée aux couplages avec l'atmosphère neutre, qui ne sont pas encore bien maîtrisés, et encore moins exploités dans le cadre général des relations Soleil-Terre.

De notre point de vue, le rôle de l'ionosphère est très largement sous-estimé et il est nécessaire d'évaluer le plus précisément possible cette contribution. De plus, les liens très étroits entre l'ionosphère et l'atmosphère n'ont pas été exploités dans leur totalité. En particulier, la capacité qu'ont les composantes du plasma à créer des particules neutres d'énergie élevée (suprathermique) qui contribuent à l'émergence d'une géocouronne chaude n'est pas encore prise en compte dans les processus de couplages ionosphère-magnétosphère.

De fait, l'étude segmentée de cette ligne de transmission ne permet pas de bien prendre en compte les rétroactions, liées notamment aux interactions fines dans le milieu ionosphérique. Par exemple, le calcul du temps de propagation le long de cette ligne, d'une perturbation depuis la surface du Soleil jusqu'à l'atmosphère n'a pas de support théorique fiable et relève surtout de l'heuristique.

Par ailleurs, les couplages internes à l'ionosphère, qu'ils soient avec l'atmosphère ou qu'ils soient entre régions de l'ionosphère, comme les échanges interhémisphériques, altèrent sensiblement la perception globale car ils sont des canaux de propagation de perturbations encore mal étudiés. Ainsi les dépôts d'énergie dans l'atmosphère par chauffage Joule sont identifiés, mais leur importance est mal évaluée avec une incapacité des modèles à reproduire quantitativement les observations.

L'impact de ces incertitudes peut être important pour la compréhension que nous avons des couplages et de cette ligne de transmission. Si l'on se place dans une perspective de système prévisionnel pour la météorologie de l'espace, des erreurs sont à craindre, qui peuvent s'avérer critiques. Par exemple, la traînée atmosphérique des satellites qui évolue sensiblement lors de perturbations, ne peut encore être "prédite" que de manière empirique, sur une base, statistique.

Il nous semble donc crucial de poursuivre les études expérimentales avec les performances croissantes des instruments disponibles et de mettre l'effort sur les outils de modélisations qui permettent de mettre en regard les observations dans un contexte plus large, tout en focalisant sur des aspects particuliers des couplages.

2. Quels sont les paramètres clés pour caractériser le système ?

Les paramètres critiques pour décrire le système peuvent revêtir deux aspects principaux :

- Ils peuvent être d'une part un moyen de caractériser l'état d'un milieu et ont donc une vocation globale. Ils peuvent être issus d'une réduction de paramètres plus détaillés du milieu, comme le contenu électronique total. Ils sont utiles pour faire une classification et faire des modèles prédictifs relativement simples. Ils peuvent déboucher sur des "proxy" qui seront utilisables pour des prévisions d'évolutions. L'exploitation conjointe des données expérimentales et des modèles numériques / empiriques est nécessaire pour définir ces paramètres.

- Ils peuvent être la caractéristique d'un couplage entre deux régions du système magnétosphérique, comme le flux de chaleur électronique qui permet de quantifier l'apport d'énergie aux électrons thermiques depuis la magnétosphère, ou bien la différence de potentiel sur la calotte polaire qui permet d'estimer l'importance de la convection et donc des couplages ionosphère-magnétosphère au niveau de l'électrodynamique. Alors que les paramètres précédents sont généralement accessibles à une mesure directe, ces derniers paramètres sont des observables cachées, non accessibles à la mesure. Ils contrôlent néanmoins une partie de la dynamique du système et leur évaluation est une nécessité. L'association expérience-simulation est de ce point de vue très importante. Nous avons démontré que les données pouvaient être "analysées" par les modèles numériques pour extraire une telle information à haute plus value.

La situation particulière de l'ionosphère, qui est directement connectée aux différentes régions de la magnétosphère, et indirectement connecté au vent solaire fait de ce milieu un lieu d'étude privilégié pour définir certains de ces paramètres, les estimer et évaluer leur pertinence par rapport à une caractérisation globale du système magnétosphérique.

Les mesures ionosphériques sont d'autant plus intéressantes, que l'ionosphère joue un rôle de filtre, qui permet de bien identifier la perturbation, la nature de la source, dès lors qu'on utilise un dispositif expérimental complémentaire couvrant une grande étendue spatiale, qui peut être facilement mis en œuvre au sol contrairement à un dispositif dans l'espace.

3. Quels sont les mécanismes de transfert d'énergie avec les couches les plus profondes de l'atmosphère, participant entre autre à l'électrodynamique ?

Même si à l'origine, la physique magnétosphérique est issue de l'aéronomie, on a un peu oublié que le système est couplé aux couches profondes de l'atmosphère. En particulier, l'atmosphère est le dépôt final de l'énergie relâchée par le système magnétosphérique et suivant la région où cette énergie est déposée, la dynamique ionosphérique varie, car les mécanismes chimiques sont très sensibles à l'énergie interne du milieu.

De plus en plus d'études montrent que des phénomènes se développent au-dessus de 100 km avec des longueurs d'onde et des fréquences caractéristiques de processus qui sont initiés en dessous. Ni l'électrodynamique, ni l'atmosphère ne s'arrêtent en dessous de 90 km et des mécanismes d'échanges existent, qui sont le support à des processus d'extraction de particules. Leur rôle dans la dynamique globale n'est pas évalué, et en particulier, les couplages verticaux

sont totalement méconnus : mode et vitesse de propagation d'ondes. Etant donné que l'amplitude des perturbations croît lorsque la concentration décroît, une perturbation atmosphérique à basse altitude peut entraîner une oscillation importante au niveau ionosphérique, ainsi que des études récentes sur l'évolution du TEC lors de tremblements de Terre. Il est donc nécessaire d'avoir une vision plus globale que notre vision actuelle et de porter l'effort sur ces mécanismes de couplages qui sont pour l'instant négligés. Par exemple, les données de DEMETER montrent l'importance insoupçonnée des effets anthropiques sur la dynamique des ceintures de radiation. Il s'agit d'un thème à la fois fondamental et appliqué à développer en collaboration avec des laboratoires spécialisés dans l'étude de la dynamique des ceintures de radiation.

Par ailleurs, la sélection par le CNES du microsatellite TARANIS ouvrirait une autre thématique très excitante, celle de tous ces phénomènes puissants mais fugitifs qui se produisent aux interfaces atmosphère/thermosphère/ionosphère et magnétosphère - 'elfes', 'sprites', 'sylphes' – quasi inconnus il y a une quinzaine d'années. Ce peut-être l'occasion de travailler sur ces couplages entre particules très énergétiques et les décharges électriques, formes de plasmas 'froids' différents de ceux que nous traitons habituellement.

B. Les moyens mis en oeuvre :

1. Instrument sols :

- *Les radars à Diffusion incohérente et les radars cohérents :*

Alors que la construction des radars SuperDARN au Dôme C (faisant suite à ceux d'Islande et Kerguelen) est maintenant acquise, la communauté a décidé de se retirer de l'association EISCAT fin 2006, tout en gardant la possibilité d'achat d'un nombre significatif d'heures d'observations. Ceci permettra de poursuivre des programmes en collaboration avec certains partenaires d'EISCAT (Japon, Norvège, Suède), d'autant plus qu'un nouveau projet ambitieux EISCAT-3D est en cours d'étude, financé par l'EU. Ce projet doit déboucher sur une demande dans le cadre du FP7-Infrastructure.

-Les mesures optiques :

La dernière campagne de l'interféromètre EPIS installé dans la station optique d'Adventalen aura lieu pendant l'hiver 2005-2006. Il sera alors rapatrié en France.

L'installation d'un interféromètre Fabry-Perot au Dôme-C est en cours d'étude.

Un projet de mesure de polarisation de la raie rouge est en cours de développement avec l'Université d'Oslo. L'instrument sera installé dans la nouvelle station optique en cours de construction à proximité des radars ESR.

2. Moyens spatiaux :

-DEMETER

DEMETER lancé le 29 juin 2004 a pour principal objectif la détection et la caractérisation des signaux électromagnétiques associés à des phénomènes naturels (tels que les tremblements de Terre, éruptions volcaniques, tsunamis) ou à l'activité anthropique. Les

données (mesure du plasma thermique, du champ électrique et des ondes) ont permis d'entreprendre l'étude :

- (i) du chauffage et de l'accélération des ions dans les régions de courants alignés intenses en utilisant également les données SUPERDARN et des mesures optiques du satellite IMAGE
- (ii) des émissions QP pendant les orages magnétiques
- (iii) des bulles de plasma à l'équateur.

-TARANIS:

Les principaux objectifs de la mission TARANIS sont :

- l'estimation du taux d'occurrence des événements lumineux transitoires (TLE) et des émissions associées, et la mise en évidence des facteurs déclenchants,
- la caractérisation des faisceaux d'électrons ("runaway electrons") accélérés de l'atmosphère vers la magnétosphère,
- la mise en évidence des effets des TLEs sur le couplage entre l'atmosphère, l'ionosphère et la magnétosphère
- la mise en évidence du rôle des électrons précipités dans le couplage entre la magnétosphère et l'atmosphère .

La mission est en phase A depuis janvier 2005. Une décision sur la phase B sera prise mi-2006.

3. Bases de données

Les données EISCAT sont archivées au CDPP à Toulouse et à Grenoble, dans la base de données associée au CDPP. Au total, ces données recouvrent pratiquement deux cycles solaires. A Grenoble, au sein du Service EISCAT de l'Observatoire, un effort est fait pour mettre de plus à disposition des paramètres à valeur ajoutée : vitesses de convection, champ électrique, TEC, paramètres réduits de la région F2.

Les données SuperDARN françaises sont accessibles sur le site du CETP.

Le Service International des Indices Magnétiques du CETP collecte les données magnétiques réparties sur la planète, construit des indices d'activité magnétique et les diffusent à la communauté internationale.

Ces services devraient évoluer vers les standards de l'Observatoire virtuel.

4. Modèles

Un modèle physique pseudo 3D de l'ionosphère « TRANSCAR » a été développé depuis plus de dix ans dans la communauté. Il a été couplé à un modèle de magnétosphère interne IMM, à un modèle d'électrodynamique locale (collaboration avec le Canada) et à un code de dégradation des protons du vent solaire. Ce modèle devrait être rendu accessible à la communauté et une base de données de simulations ionosphériques devrait être développée et intégrée dans l'Observatoire Virtuel.

Le modèle IMM a par ailleurs été couplé avec le modèle de circulation générale TIEGCM du NCAR qui décrit la dynamique tridimensionnelle de l'ionosphère et de la thermosphère terrestre, pour donner naissance au MTIEGCM (Magnetosphere-Thermosphere-Ionosphere Electrodynamics General Circulation Model). Il doit maintenant être confronté aux observations.

Un nouveau modèle semi-empirique de la thermosphère est en développement à partir des données de CHAMP.

VII. Relations Soleil-Terre et Météorologie de l'Espace

Le thème des relations Soleil-Terre et de la météorologie de l'espace se trouve aujourd'hui à une époque charnière, pour des raisons plus politiques que scientifiques. Sa prospective est donc fortement liée au contexte international. La météorologie de l'espace a la particularité d'avoir pour objectif final la création de produits opérationnels destinés à des utilisateurs. Or de tels produits ne peuvent être conçus sans une activité de recherche et de coordination en amont. C'est précisément sous cet angle que la thématique sera abordée dans ce qui suit.

Les années 1985-1995 ont été marquées par une prise de conscience croissante de l'impact de l'activité solaire sur l'environnement spatial et sur la nécessité de mettre l'accent sur l'étude des interactions entre différents milieux. Dès 1995, sous l'impulsion de la communauté américaine (et en particulier du Space Environment Center à Boulder), des contacts furent noués entre utilisateurs (essentiellement l'armée américaine mais aussi des industriels) et chercheurs, dans le but de développer des modèles de prévision. Paradoxalement, c'est à cette même période que de nombreux observatoires sol importants pour l'étude des relations Soleil-Terre (ionosondes, magnétomètres, ...) cessaient de fonctionner. C'est à cette époque aussi que le centre de prévision de Meudon transféra ses compétences à l'Observatoire de Bruxelles d'une part et à la société Collecte Localisation de Satellites (CLS, Toulouse) d'autre part. En 1999, l'étude menée par deux consortiums pour l'ESA sur la définition d'un programme européen de météorologie de l'espace, signala une prise de conscience d'une communauté européenne caractérisée par de nombreuses initiatives, de fortes compétences mais peu de coordination. Aujourd'hui, le seul programme fédérateur d'envergure est le programme International Living With a Star (ILWS), qui est coordonné par la NASA et qui constitue une évolution du Solar-Terrestrial Program (STP) vers les besoins plus appliqués de la météorologie de l'espace.

Les prochaines années vont être marquées par plusieurs missions, dont notamment :

- STEREO (lancement en avril 2006) qui offrira pour la première fois une vision stéréoscopique du Soleil ; plusieurs équipes françaises y sont fortement impliquées
- PROBA2 (lancement en 2007) un satellite technologique de l'ESA avec de l'imagerie UV du Soleil à haute cadence.
- Solar Dynamics Observatory (lancement en 2007) : satellite de la NASA pour l'observation du Soleil. SDO sera la pierre angulaire du programme ILWS.
- TARANIS : microsatellite du CNES pour l'étude du couplage stratosphère-ionosphère. Il pourrait être lancé vers 2011.
- PICARD : microsatellite du CNES pour l'étude du lien entre l'activité solaire, l'irradiance et le climat.

Notons ici la prépondérance accordée à l'imagerie solaire. A cette liste non exhaustive s'ajoutent divers projets de collaboration avec la Chine, notamment SMESE pour l'observation sub-millimétrique, UV et X du Soleil, ainsi que KUAFU pour la surveillance du vent solaire en L1. En l'espace de quelques années, la Chine est ainsi devenue un partenaire potentiel de choix pour de nouvelles missions.

Certains domaines, tels que les ceintures de radiation, sont moins bien couverts que d'autres. La France possède de fortes compétences dans la modélisation des ceintures (notamment à l'ONERA) mais il faudra attendre 2012 pour une implication dans la mission Radiation Belt Storm Probes (RBSP) de la NASA. En revanche, les futures missions planétaires laissent augurer un regain d'intérêt pour l'interaction entre l'activité solaire et les environnements

planétaires. Ces différentes missions seront complétées par d'autres moyens indirects, comme la constellation GALILEO, qui sera utile pour assurer un suivi du contenu électronique total. Hormis RBSP et SDO, qui rentrent dans le cadre du programme ILWS, peu de missions ont été conçues pour assurer un suivi permanent de l'environnement spatial, tel que le requiert un programme de météorologie de l'espace. Des études sont en cours pour proposer de nouveaux instruments spatiaux dédiés, notamment un télescope H α et un radiospectrographe pour la détection des émissions radio de type II (traceur d'ondes de choc coronales et interplanétaires).

Les instruments sol continuent à jouer un rôle-clé. Le retrait progressif de la communauté française d'EISCAT est le reflet d'une réorientation vers d'autres thématiques, comme les ionosphères planétaires. Le réseau de radars SuperDARN fournit maintenant de façon routinière des cartes de la convection ionosphérique et sa couverture géographique va en augmentant, avec notamment un projet d'extension au dôme C et en Sibérie. SuperDARN souffre cependant de manques de données lors d'éruptions solaires. Le radiohéliographe de Nançay est un instrument de choix pour étudier l'accélération des particules dans la couronne. Le futur radiohéliographe américain FASR offrira bientôt une résolution spatiale et une gamme de longueurs d'onde accrues et ouvrira ainsi l'accès à l'émission radio dans la région correspondant aux sites d'accélération. La France y est fortement impliquée. Un projet d'extension en Chine est en cours, ce qui avec la station Nançay permettrait enfin d'assurer une surveillance permanente du Soleil. Enfin, à plus long terme, il est envisagé de consacrer une partie du temps d'observation du radar LOIS (qui fait partie du télescope radio LOFAR) au sondage de la haute couronne solaire.

En ce qui concerne les autres instruments sol (magnétomètres, ionosondes...), c'est généralement le service minimum qui prévaut, dans le seul but de ne pas interrompre les mesures historiques. Ce contraste entre la réduction des moyens existants et les besoins croissants à lui seul résume bien la situation délicate dans laquelle se situe aujourd'hui la discipline.

Dans le domaine de la modélisation et de la simulation, un axe fort reste celui de la modélisation du magnétisme solaire. Notons en particulier l'étude du déclenchement des CME et la reconstruction du champ magnétique coronal. Ces études, associées à un outil tel que FROMAGE (French Online Magnetic Extrapolations) contribuent aujourd'hui fortement au rayonnement de la communauté dans cette discipline. A l'autre extrémité de la chaîne Soleil-Terre, des modèles ionosphériques tels que TRANSCAR jouent un rôle important dans la spécification de l'ionosphère. Dans les deux cas, une part croissante des activités de modélisation comprend la recherche de paramètres-clé, toujours dans le but de mieux caractériser le milieu à partir d'observations lacunaires.

La problématique de la discipline se résume aujourd'hui aux points suivants :

Le contour de la discipline reste flou. Si le cadre de l'étude des relations Soleil-Terre est bien défini, celui de la météorologie de l'espace est encore flou. Ceci constitue aujourd'hui un obstacle sérieux lors du choix des programmes ou des agences auquel un projet peut émerger. L'existence de multiples guichets avec des conceptions différentes de la discipline constitue un frein logistique important. L'incertitude qui plane actuellement sur les possibilités de financement d'un programme spatial par l'union européenne (= programme à vocation purement utilitaire, de type GMES) ou par l'ESA (= programme à vocation purement scientifique) en est un exemple typique.

Le soutien de fonds public est et restera prépondérant. En effet, les besoins des utilisateurs restent encore imprécis et réciproquement les produits scientifiques conviennent souvent mal aux exigences des utilisateurs. Il est donc prématuré d'envisager un financement privé pour l'exploitation et encore moins pour le déploiement d'un service de météorologie de l'espace, même s'il existe aujourd'hui des services pour un noyau dur d'utilisateurs. Sachant que les actions de R&T ne sont pas du ressort du PNST, ce dernier est bien placé pour inciter et soutenir la recherche scientifique en amont.

Les effets à long terme restent à explorer. Les études scientifiques ont jusqu'ici surtout mis l'accent sur les événements ponctuels et leur prévision, rencontrant notamment des difficultés dans le transfert de compétences vers des utilisateurs. Or l'étude statistique des effets à long terme est un domaine peu exploré dont l'importance a été sous-estimée. L'émergence d'une climatologie de l'espace devient l'occasion de renforcer une interaction déficiente entre les communautés spatiale et climatologique. Il reste ici à identifier les actions possibles. Des projets pourront se concrétiser autour des missions TARANIS et PICARD, à condition que ceux-ci bénéficient d'un soutien structurant de la part des programmes nationaux.

Le mode d'exploitation des données existantes est important. Beaucoup de produits existants peuvent aujourd'hui servir à peu de frais à des études en relations Soleil-Terre et en météorologie de l'espace. Toutefois, la fusion de jeux de données très hétérogènes et le suivi en temps réel sont des contraintes que ne rencontrent guère les autres disciplines. Lors de la définition d'une mission ou du mode opératoire d'un instrument, il est donc important de tenir compte des contraintes qui pourraient lui donner de la valeur ajoutée. La mise à disposition de données sol ou espace en temps réel sur internet va dans ce sens.

Le rôle du PNST consiste ici à veiller à ce que les besoins de la thématique soient pris en compte dans les projets. Une attention particulière devra être accordée aux bases de données et aux observatoires virtuels, qui sont des outils de choix pour les études multi-instruments.

La coordination ne peut se concevoir qu'au niveau international. Tous les points ci-dessus soulignent l'absolue nécessité d'une coordination internationale, tant au niveau de la définition des projets que de leur financement et de leur exploitation. Notre communauté française dispose de fortes compétences (cf. bilan du thème 6) mais sa fragmentation nuit à toute action constructive. Il en est de même au niveau européen. La quasi-absence de référence aux relations Soleil-Terre dans le livre blanc de l'union européenne (hormis sous la rubrique sécurité et défense) est une conséquence directe de ce manque de coordination. Il faut néanmoins souligner l'existence de quelques programmes. CAWSES (étude des impacts sociétaux de l'environnement terrestre) a contribué au rapprochement de différentes communautés concernées par l'étude de la variabilité dans le système Soleil-Terre. Le programme COST 724, dont l'objectif est de développer la compréhension scientifique en amont de la météorologie de l'espace, permet de fédérer des activités de recherche appliquée au niveau européen.

Aujourd'hui, l'implication dans une action européenne est compromise s'il n'existe pas un soutien de la part d'un projet national structurant. Le PNST doit devenir un représentant de la communauté scientifique française afin qu'en collaboration avec les autres partenaires français (CNES, Ministère de la défense, ONERA, ...) l'implication au niveau international soit renforcée.

VIII. Bases de données

Les données de la communauté Soleil-Terre, qu'elles soient d'origine sol ou spatiale, sont regroupées dans trois bases de données qui ont chacune leurs propres spécificités et leur propre statut. Leur perspectives propres sont donc également différentes : développer l'ergonomie de l'interface homme-machine et les services à valeurs ajoutés pour le CDPP, finir de mettre en place le dépouillement standard des données THEMIS pour BASS2000, continuer les campagnes d'observation SOHO et mettre à disposition les nouvelles données SECCHI de STEREO pour MEDOC en sont quelques exemples.

Parallèlement à leurs activités spécifiques, les bases de données de notre communauté se sont aussi impliquées ces dernières années dans le développement de l'Interopérabilité: BASS200 et MEDOC ont activement participé au projet Européen EGSO, prototype opérationnel d'un Observatoire Virtuel Solaire, et le CDPP a été moteur dans la collaboration SPASE, pour l'accès aux données de « Physique Spatiale ». Le soutien de l'Action Spécifique Observatoire Virtuel, créée en 2004, a permis non seulement de soutenir les activités internationales de notre communauté autour de l'Interopérabilité mais aussi et surtout de mettre en place une réflexion commune autour de ce qui sera l'Observatoire Virtuel du Système Solaire (Soleil, héliosphère, plasmas). C'est le nouveau challenge de notre communauté de participer activement à la mise en place de l'Euro-OV-Système Solaire. Un projet de micro-OV entre MEDOC et le CDPP, centré sur STEREO est dès à présent en discussion entre les responsables scientifiques.

Les perspectives spécifiques de chaque centre de données sont présentées ci-après.

A. Centre de Données de la Physique des Plasmas (CDPP)

La modification du protocole d'accord CNES/INSU aujourd'hui soumise aux tutelles et la mise en place d'un Comité d'Utilisateurs devraient entraîner une nouvelle phase de fonctionnement du CDPP et aboutir à une interaction plus forte du CDPP avec la communauté.

Le CDPP entre ainsi dans une nouvelle phase qui devrait l'amener à devenir un service ergonomique et offrant une forte valeur ajoutée aux données qu'il fournit. Pour cela:

- il développera une interface plus ergonomique et conviviale en ayant le souci de rendre l'accès aux données plus simple et immédiat;
- il collectera des données pour lesquelles il n'est pas mandaté à priori, mais dont la mise à disposition est nécessaire pour compléter et valoriser celles qui y sont archivées;
- il procédera dès que possible à l'archivage des données obtenues par les expériences récentes ou en cours d'opération (CLUSTER, STEREO, THEMIS, CASSINI-MAPS, DEMETER, ...);
- il investira un effort important et soutenu dans le développement de son service à valeur ajoutée pour offrir (i) des outils de traitement et d'analyse classiques permettant aux utilisateurs de gagner beaucoup de temps mais aussi (ii) des outils novateurs de comparaison et d'analyse statistique, systématique ou historique permettant des recherches conditionnelles d'événements ou de reconnaissance automatique de signatures caractéristiques à partir des mesures;

- il stimulera une large participation des chercheurs de la communauté autour d'une nouvelle activité de recherche visant à développer les outils mentionnés ci-dessus et à l'étude historique du système magnétosphérique (les données du CDPF couvrent près de 30 ans d'exploration spatiale), en vue notamment du développement de la météorologie spatiale.

Conjointement, le CDPF continuera et renforcera son implication dans les grands projets nationaux et internationaux et dans le développement de l'interopérabilité en vue de construire des Observatoires Virtuels (OV). En particulier, il continuera de participer activement à la définition du modèle des données, du dictionnaire des méta-données, et d'une maquette d'exploitation du projet international SPASE (Space Physics Archive Search).

B. BASS2000

Trois grands axes de développements sont proposés par ce service pour les années à venir : élargissement des catalogues à de nouveaux producteurs, valorisation des données présentes dans le catalogue et interopérabilité entre bases de données, à l'échelle française (avec MEDOC notamment) et européenne.

1. Nouveaux producteurs de données solaires

A Tarbes, outre les producteurs déjà intégrées dans la base (THEMIS, NRH) ou envisagés à très court terme (le Coronographe du Pic du Midi, la Lunette Jean Rösch avec le projet CALAS en particulier à l'horizon 2005-2006 et le projet de numériser les données anciennes), plusieurs producteurs nouveaux peuvent être envisagés à moyen ou long terme : les instruments de spectropolarimétrie stellaires NARVAL au TBL et ESPADONS au CFHT et les données MUSICOS déjà obtenues au TBL, bénéficieraient grandement d'une archive commune permettant un accès simple par l'ensemble de la communauté à ces données publiques. L'équipe BASS2000 à Tarbes pourrait développer une archive spécifique (conception et définitions, réalisation technique de la base, éventuellement maintenance), l'intégration des données dans le catalogue étant assuré par l'équipe du TBL. Ce travail pourra être effectué à l'horizon 2007.

Les données issues de tout projet solaire sol soutenu par la communauté sont susceptibles d'être intégrés dans le catalogue BASS2000 et nécessiteront des développements plus ou moins lourds. A l'heure actuelle ces projets ne sont pas entièrement définis mais pourraient être des coronographes au Pic du Midi à l'horizon 2007-2010, des projets d'instrumentation au Dôme C, et à plus long terme, les données de l'ATST (Advanced Technology Solar Telescope) pour lesquelles une proposition de participation à l'archivage sera faite. Il est par ailleurs envisagé d'enrichir l'archive de Meudon, avec des données de même type, et tout particulièrement à court terme, celle de l'Observatoire de Catania (Sicile).

2. Valeur ajoutée sur les données

Cette action se fera dans la continuité de ce qui est engagé depuis 2004. A Tarbes, le dépouillement standard des données du mode DPSM de THEMIS (spectro-imagerie) est mis en place, avec pour objectif de dépouiller les données futures au fur et à mesure qu'elles arriveront à BASS 2000. En 2005-2006, le dépouillement des données du mode MTR de THEMIS (spectro-polarimétrie) pourra débuter probablement à l'aide d'un code fourni par THEMIS et une interface développée par BASS 2000. En parallèle à ces activités de

dépouillement, des ateliers sont régulièrement organisés: formation au dépouillement, organisation de discussions entre experts. Cette activité pourra aussi s'étendre aux autres producteurs de données (données spectro-polarimétriques stellaires en particulier).

L'équipe de Meudon va également poursuivre ses efforts afin d'automatiser la construction des cartes synoptiques synthétiques de l'activité solaire, en particulier en utilisant les développements effectués dans le cadre d'EGSO. Une réflexion sur l'adjonction de nouvelles plus-values sur les observations déjà disponibles sera également effectuée.

3. Interopérabilité entre bases de données

L'interopérabilité entre bases de données solaires devra se faire dans le cadre des observatoires virtuels en développement. La suite qui sera donnée à EGSO (programme qui s'est terminé en juin 2005) au niveau européen conditionnera forcément l'implication de BASS2000. L'équipe de Meudon sera également impliquée dans les projets OV de l'Observatoire de Paris.

C. MEDOC

MEDOC devient MEDOC-NG, pôle thématique solaire spatial, dont l'atout repose sur la diversité des données archivées : SOHO bien sûr mais aussi, SPIRIT/CORONAS, TRACE et MOST. Dès l'été 2006, ce centre archivera et mettra à disposition les données SECCHI de STEREO. Des outils de visualisation des divers instruments sont en cours de développement pour permettre la superposition de l'ensemble des champs de vue pour chaque satellite. Comme cela est fait pour l'ensemble des films EIT/SOHO (<http://www.ias.u-psud.fr/eit/movies>), les films SECCHI seront mis à disposition dès les premières données. A plus long terme, MEDOC-NG pourra logiquement participer à l'archivage des données PICARD, LYOT/SMESE, SDO et Solar Orbiter.

MEDOC-NG continuera d'organiser des campagnes d'observations coordonnées multi instruments une fois par an jusqu'à la fin des opérations SOHO. Dès l'automne 2006, des campagnes conjointes avec STEREO pourront être mises en œuvre. Une mini campagne exceptionnelle aura lieu à l'occasion de l'éclipse totale du Soleil, le 29 Mars 2006, en collaboration avec les équipes sol.

MEDOC-NG continuera également à accueillir les visiteurs souhaitant profiter à court terme de l'expertise sur SOHO, COROT et SECCHI, et à organiser, en moyenne une fois par an, des écoles et des ateliers internationaux portant notamment sur le traitement des données archivées. Le prochain atelier international, à l'automne 2006, portera sur l'analyse des premiers résultats de SECCHI en accord avec le consortium SECCHI. Il pourra être étendu à l'ensemble des données STEREO.

MEDOC-NG est impliqué à l'échelle nationale et Européenne dans la réflexion portant sur les observatoires virtuels. Un projet de micro-OV entre MEDOC et le CDPP est en discussion pour créer un lien inter-opérant permettant aux plasmiciens et aux solaires d'accéder aux données SWAWES et SECCHI de STEREO ainsi qu'aux produits dérivés.

IX. Instrumentation sol

A. THEMIS

Le télescope THEMIS, dont les premières observations remontent à 1999, fournit des résultats en constante amélioration, notamment dans son domaine d'excellence et d'originalité que constitue la spectro polarimétrie multi-raies et la spectro imagerie polarimétrique. Néanmoins, la qualité des images actuellement modeste nécessite une amélioration pour remplir les objectifs scientifiques initiaux : la mise en place d'un tip-tilt, en 2006, est un premier élément positif de réponse, qui va de pair avec une jouvence des détecteurs pour exploiter un pixel plus petit (jouvence étalée sur 2005-2007). La question sur l'opportunité d'implanter un système d'optique adaptative est posée, notamment dans le contexte de la renégociation des accords franco italiens de 2009. L'ouverture à d'autres techniques de spectro-polarimétrie que la modulation lente (par exemple la modulation rapide, le Zimpol) est un point fort en cours de développement pour les années à venir.

B. ATST

L'Advanced Technology Solar Telescope est un projet américain de télescope 'versatile' de 4 m de diamètre sans polarisation fonctionnant du visible à l'IR lointain (30 μ), muni d'optique adaptative et doté d'une large panoplie d'instruments focaux permettant entre autres des recherches en spectro-polarimétrie dans un domaine spectral étendu, en haute résolution angulaire. Le projet ATST constitue une opportunité unique à ne pas manquer de mettre en opérations un télescope solaire exceptionnel à l'horizon 2015 dans un cadre reposant sur une large collaboration internationale. Ceci garantirait à la communauté solaire sol européenne un accès au plus grand télescope solaire optique du monde tout en ouvrant, en contrepartie, sa gamme de télescopes de la « classe 1 m » (THEMIS, Swedish Solar Telescope, GREGOR allemand) aux équipes américaines dont les programmes scientifiques ne nécessiteraient pas l'usage d'un télescope de 4 m pour lequel la pression d'utilisation sera certainement très élevée. Parmi les actions qui pourraient permettre de concrétiser une participation française au projet ATST, on pourrait proposer par exemple:

- l'utilisation de THEMIS pour toutes sortes d'expériences et tests utiles à ATST: caractérisation de la polarisation instrumentale sur un grand télescope, optique adaptative classique et multi conjuguée (MCAO), évaluation de nouveaux détecteurs et dispositifs polarimétriques
- l'extension de BASS 2000 pour la mise sur pied d'une archive européenne des futures données ATST incluant la production de résultats élaborés issus de compétences reconnues, comprenant l'inversion rapide de données magnétométriques vectorielles et l'extrapolation de données photosphériques vers la couronne

C. Lunette Jean Rösch

La lunette du Pic du Midi possède des atouts qui la rendent encore très concurrentielle dans les domaines qui exploitent la haute résolution spatiale permise par la qualité du site du Pic du Midi : l'imagerie à grand champ (projet CALAS) et la spectro-polarimétrie des raies bleues, en raison d'une bonne transmission de son spectrographe à ces longueurs d'onde où se situent les raies les plus polarisées du second spectre. Le projet CALAS (10' de champ) devrait aboutir en 2006 sur une exploitation à l'échelle d'un cycle solaire. Il pourrait être prolongé par un Super CALAS soleil entier. En ce qui concerne la polarimétrie, le spectrographe de la LJR est utilisé pour l'étude du second spectre et des champs magnétiques faibles et turbulents.

D. Coronographie

Une nouvelle génération d'instruments en préparation pour le soutien STEREO au Pic du Midi, successeurs de HACO, fournira à partir de 2007 des images de la couronne froide (protubérances en H α et He10830) mais aussi chaude (raie IR de FeXIII), ainsi que des images du disque en H α , dans le cadre des Observateurs Associés.

La détermination du champ magnétique coronal par spectro polarimétrie de raies d'émission du proche IR de la couronne est une priorité bien affichée de la physique solaire ; notre communauté peut y participer, au sein de collaborations comme celle de l'Université d'Hawaii, qui dispose d'un coronographe de 50 cm de diamètre, sur le site probable d'ATST. L'étude du site du Dôme C avec un Sky Brightness Monitor (SBM) dans le cadre de l'étude d'un projet de coronographe international dédié à la mesure des champs coronaux entre dans cette mouvance.

E. Radiohéliographe de Nançay (NRH)

Le support de STEREO constitue la priorité des 4 prochaines années. Le radiohéliographe de Nançay et les coronographes embarqués auront un champ d'observation commun. Peu d'observations jusqu'ici ont été obtenues en commun avec des coronographes spatiaux à une époque où le NRH n'était pas encore multi fréquence. A plus long terme, la justification du maintien en service du NRH ne pourra être trouvée que dans une perspective internationale (observation de l'activité solaire 24 heures sur 24, en complément des deux radiohéliographes américain FASR et chinois en construction). La nécessité d'une surveillance permanente peut être justifiée par l'appui aux coûteuses observations spatiales (Solar Orbiter après 2015), ou une activité plus opérationnelle de relations Soleil - Terre (météorologie spatiale).

F. Frequency Agile Solar Radio Telescope (FASR)

Deux projets de radiohéliographes sont en cours : le projet américain FASR (Frequency Agile Solar Radiotelescope) d'une centaine d'antennes qui devrait permettre de faire pour la première fois de l'imagerie radio rapide dans la gamme 0.1-30 GHz et un second réseau en Chine. Les radioastronomes français participent activement à la définition de ces deux projets. La participation à FASR consiste en une étude d'implantation des algorithmes et d'une voie numérique adaptée aux bandes basses fréquences de l'instrument (100 à 300 MHz, et 0.3 à 3 GHz). La communauté française est particulièrement intéressée aux fréquences 100 à 500 MHz pour l'étude des processus non-thermiques dans la couronne et des relations Soleil-Terre. Deux antennes du radiohéliographe de Nançay ont été modifiées pour tester une voie à haute dynamique, et la réalisation d'une voie à dynamique plus faible se fera en 2006, correspondant mieux aux besoins de la bande 0.3 à 3 GHz. La construction d'un prototype basse fréquence est prévue à partir de 2007. La mise en service de FASR pourrait survenir en 2011.

G. LOIS/LOFAR

Une partie du temps d'observation du radar LOIS qui fait partie du projet d'interféromètre radio généraliste LOFAR pourrait être consacrée au sondage de la haute couronne solaire. L'activité de la communauté radio française autour de LOFAR consiste actuellement en des tests de corrélations VLBI entre la Hollande et Nançay. De nouvelles observations sont prévues à partir de Mars 2006.

H. SUPERDARN

Le réseau SuperDARN (Dual Auroral Radar Network) est actuellement constitué d'un ensemble de radars HF couvrant à la fois les hémisphères nord (10 radars) et sud (7 radars). La participation française à ce réseau comprend le radar de Stokkseyri en Islande et le radar de Kerguelen. La couverture en longitude des radars de l'hémisphère sud sera réalisée grâce à la construction de deux radars à visée équatoriale au Dôme C. C'est un projet franco-italien (50%,50%) dans le contexte de deux autres projets en émergence : un projet américain au pôle sud (demande NSF déposée) et un projet chinois de radar installé à Zhongshan sur la côte de l'Antarctique sous le champ de vue du radar de Kerguelen. SuperDARN participe à des mesures coordonnées avec les missions multi-satellites, actuellement Cluster et Double Star, dans un proche avenir THEMIS, puis à terme MMS.

I. EISCAT

La communauté PNST a décidé de se retirer de l'association EISCAT fin 2006, tout en gardant la possibilité d'achat d'un nombre significatif d'heures d'observations. Ceci permettra de poursuivre des programmes en collaboration avec certains partenaires d'EISCAT (Japon, Norvège, Suède), d'autant plus qu'un nouveau projet ambitieux EISCAT-3D est en cours d'étude, financé par l'EU. Ce projet doit déboucher sur une demande dans le cadre du FP7-Infrastructure.

Rapport administratif 2002-2005

Rapport administratif du PNST pour le mandat 2002-2005

I. Conseil Scientifique et direction du PNST

Le Conseil Scientifique du programme a été présidé par Alan GABRIEL de 1998 à 2003, il est présidé par Nicole VILMER (pôle solaire du LESIA) depuis janvier 2004 et comporte 17 autres membres:

Gérard BELMONT (CETP)
Jean-François DONATI (LAOMP)
Nicolas DUBOULOZ (LPCE)
Thierry DUDOK de WIT (LPCE)
Marianne FAUROBERT (LUAN)
Dominique FONTAINE (CETP)
Alan GABRIEL (IAS)
Ludwig KLEIN (LESIA)
Chantal LATHUILLERE (LPG)
Dominique LeQUEAU (CESR)
Jean-Marie MALHERBE (LESIA)
Milan MAKSIMOVIC (LESIA)
Thierry PASSOT (CASSIOPEE)
Michel RIEUTORD (LAOMP), a succédé à Tahar AMARI en 2005
Jean-André SAUVAUD (CESR)
Jean-Claude VIAL (IAS)
Philippe ZARKA (LESIA)

Les invités permanents au CS du PNST sont :
Bernard LEROY (chargé de mission à l'INSU)
Jean-Yves PRADO (CNES/DSP/E2U)
Martine REVILLON (cellule programmes de l'INSU)

La direction du PNST a été assumée par Alain ROUX (CETP) de 1998 à 2003, puis par Gérard CHANTEUR (CETP) depuis janvier 2004.

Le Conseil scientifique définit la politique scientifique du programme, assure une veille des programmes internationaux concernant les relations Soleil-Terre (les missions spatiales, les grands instruments au sol, mais aussi les projets coopératifs européens comme le programme Eurocores E-STAR ou les programmes européens de météorologie de l'espace), assure le suivi des projets d'instruments sol intéressant sa communauté (FASR, ATST, LOFAR/LOIS, SuperDARN, équipements au Dôme-C, ...), veille à la mise à jour de la prospective, et offre une expertise dans son domaine de compétence. Le directeur est plus spécialement chargé des relations avec les tutelles et du budget. Nonobstant cette différence des fonctions de direction du programme et de présidence du CS, et le fait que le tandem de direction comporte depuis la création du programme un physicien solaire et un physicien magnétosphéricien, le programme doit pouvoir être représenté indifféremment par la direction ou la présidence du CS. Le cas échéant un membre du CS peut être délégué pour représenter le programme.

II. Budget

La dotation du PNST provient de l'INSU et du CNES et son évolution est illustrée par la figure 1: la dotation de l'INSU est passée par un minimum en 2004 et n'a pas encore retrouvé en 2005 son niveau de 2002, le soutien du CNES est passé de 51k€ en 2002 à près de 70k€ en 2005 après une disparition totale pendant l'année noire 2003. La dotation globale 2005 est comparable à celle de 2002.

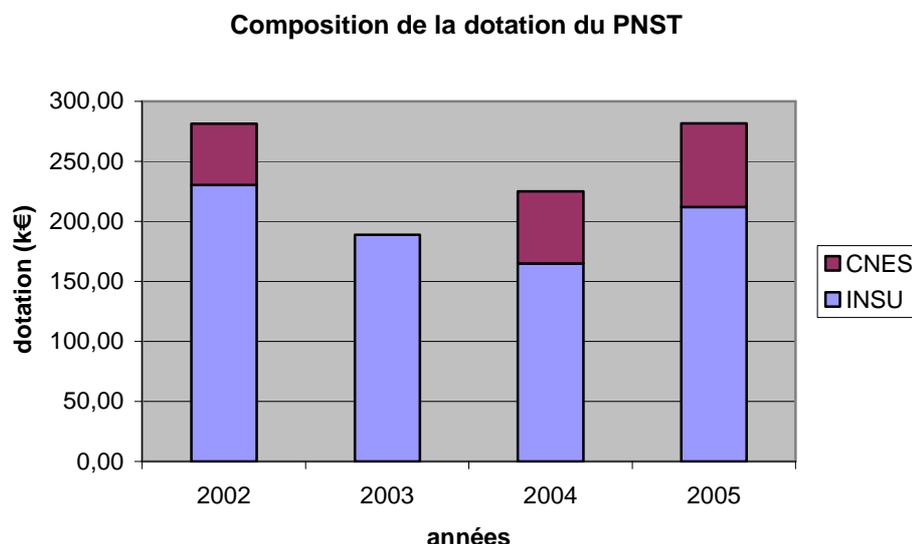


Figure 1. Evolution de la dotation du PNST pour la période 2002-2005

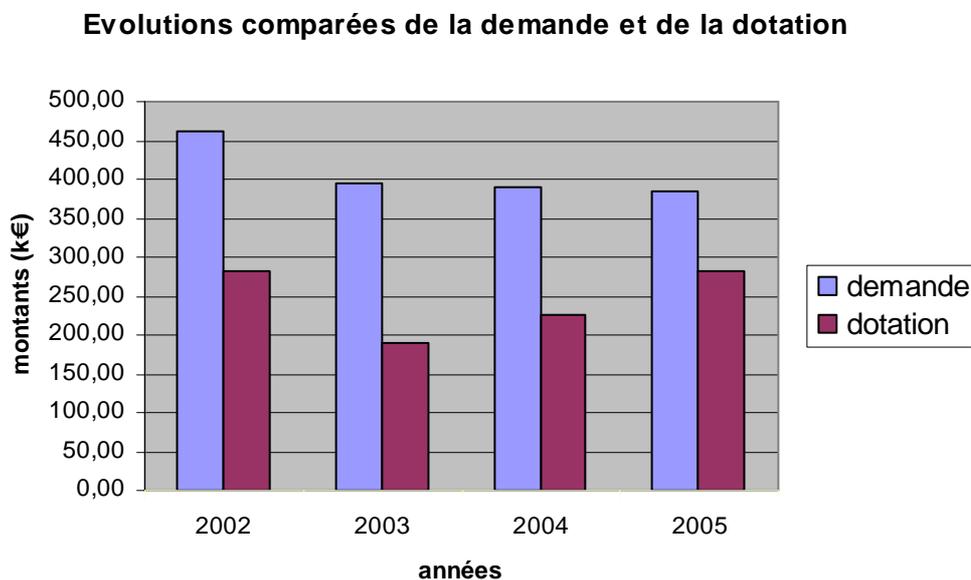


Figure 2. Evolutions comparées de la demande et de la dotation du PNST

La **demande** est pratiquement constante depuis 2003 comme le montre la figure 2, et de fait la pression a diminué en particulier grâce à un effort du programme et de la communauté pour favoriser les demandes de collaborations entre équipes. La pression diffère toutefois selon les types d'activité, ce point sera détaillé par la suite.

La **distribution du budget**, hors fonctionnement, est illustrée par la figure 3 qui montre les montants des allocations distribuées pendant les quatre années du mandat 2002-2005. Les

trois allocations les plus importantes sont récurrentes et par ordre décroissant concernent les radars cohérents SuperDARN, la base de données solaires sol BASS-2000, et le CDPP, base de données des plasmas spatiaux. Le Radiohéliographe de Nançay vient habituellement en quatrième position, sauf en 2005 où il est devancé par la R&D pour le projet FASR. A noter que la queue de distribution des allocations inférieures à 5k€ qui était en progression de 2002 à 2004, parallèlement à l'augmentation du nombre de demandes, a été fortement réduite en 2005 grâce à la compréhension de la communauté qui a entendu l'appel du programme à des actions plus coopératives.

distribution du budget (hors fonctionnement)

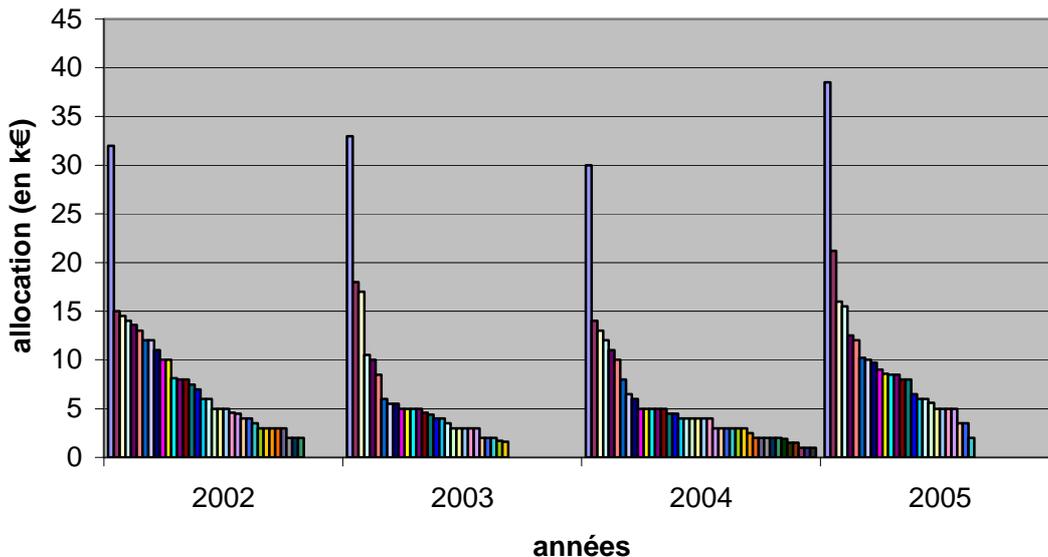


Figure 3. Distribution du budget, hors fonctionnement : chaque barre représente une allocation dont le montant est proportionnel à la hauteur de la barre. En 2002, 34 allocations ont été distribuées pour 37 demandes ; en 2003, 28 pour 32 ; en 2004, 40 pour 45 ; en 2005, 26 pour 29.

La répartition du budget par type d'activité est illustrée par la figure 4. La définition des catégories d'activité comportant une part d'arbitraire, il est nécessaire de préciser leur contenu et d'apporter quelques commentaires :

1. collaborations entre équipes : travaux théoriques ou d'analyse et d'interprétation des données spatiales et des observations au sol
2. instruments sol : soutien aux équipements au sol, hors TGE, et soutien à la construction d'instruments destinés à ces équipements
3. bases de données : les deux composantes de BASS-2000 et le CDPP. MEDOC étant initialement une base de données spatiales dédiée à SOHO et soutenue par le CNES, le soutien du PNST se limite ici au financement d'ateliers. Ce statut particulier de MEDOC au sein du PNST pourrait évoluer parallèlement à la modification et à l'élargissement de sa mission.
4. observations : soutien des observations au Pic du Midi et à EISCAT pour l'essentiel.
5. ateliers, colloques ; il s'agit ici des demandes concernant uniquement l'organisation de colloques ou d'un soutien particulier pour garantir une participation française à un colloque important, comme ce fut le cas en 2005 avec SPW4, le 4^{ème} Solar Polarization Workshop, pour afficher les résultats obtenus par la communauté française avec THEMIS. De fait les demandes de coopération comportent parfois une

demande de soutien à l'organisation d'ateliers ou de colloques. A noter que les colloques nationaux organisés par le PNST sont mis dans cette catégorie et non dans le fonctionnement du programme. L'allocation relativement élevée de 2004 est due au colloque national d'Autrans, le programme ayant payé l'organisation du colloque et les frais de séjour de tous les participants (les frais de transports ont été à la charge des laboratoires). Le coût du colloque de bilan et prospective organisé en septembre 2005 à Paris est inférieur à celui du colloque d'Autrans. En dépit d'un coût plus élevé l'organisation d'un colloque national « à la campagne » est un moment important de la vie de la communauté, en particulier parce que le huis clos favorise plus les contacts entre équipes et entre générations qu'un colloque organisé dans le voisinage immédiat d'un grand pôle scientifique : il offre aussi une occasion exceptionnelle aux jeunes chercheurs, doctorants et post-docs, de présenter leurs travaux à la communauté.

6. fonctionnement : missions des membres du CS et du directeur nécessitées par la gestion ou la politique scientifique du programme, occasionnellement missions pour des présentations invitées d'activités du programme (par exemple 2 missions à la SF2A en 2005).

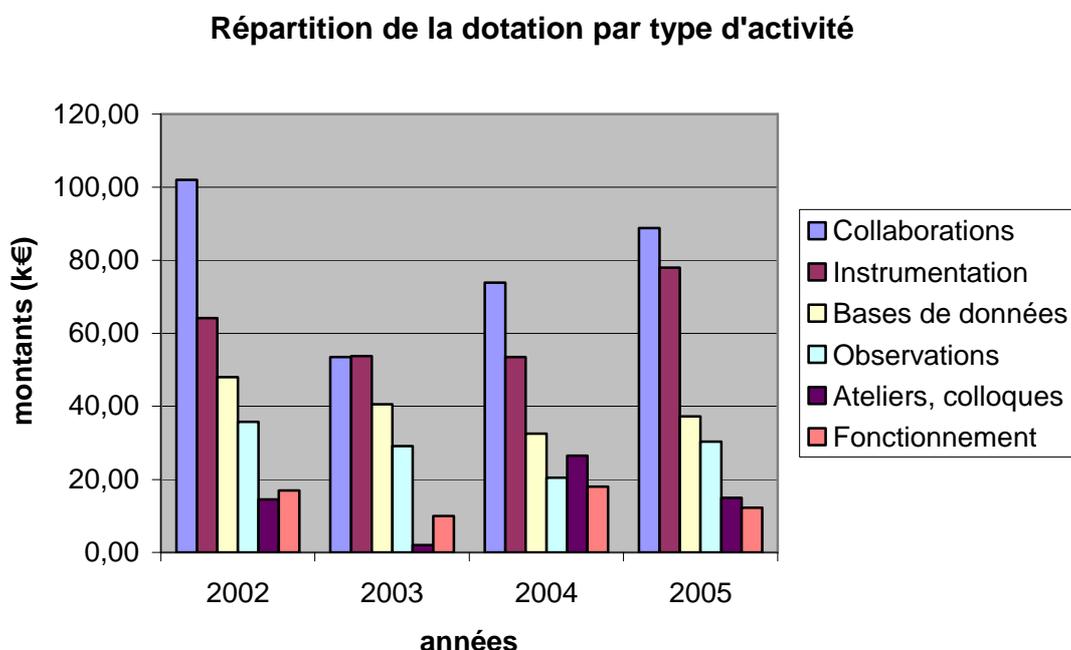


Figure 4. Répartition de la dotation par type d'activité. Les catégories sont classées par cumuls quadriennaux décroissants : voir le texte pour leur définition.

La pression par type d'activité est illustrée par les figures 5a (bases de données) 5b (instruments sol), 5c (observations) 5d (collaborations). La pression moyenne sur la période 2002-2005, définie par le rapport du cumul quadriennal des demandes au cumul quadriennal des allocations, est égale à 1,6 pour les bases de données et 1,5 pour les instruments au sol, situation relativement satisfaisante. La frustration est plus grande pour les observations (1,9) et surtout pour les collaborations (2,1) : lors des contractions budgétaires ces deux dernières catégories sont plus vulnérables que les deux premières qui comportent des coûts de fonctionnement difficilement compressibles.

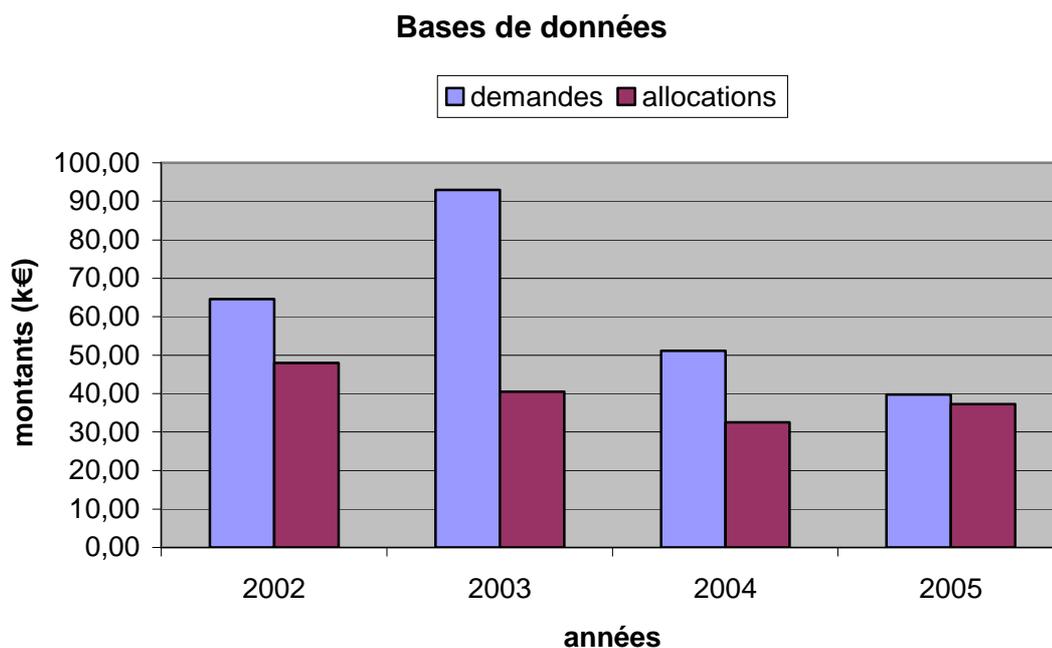


Figure 5a. Comparaison des demandes et des allocations pour les bases de données. Pression moyenne sur 4 années = 1,6.

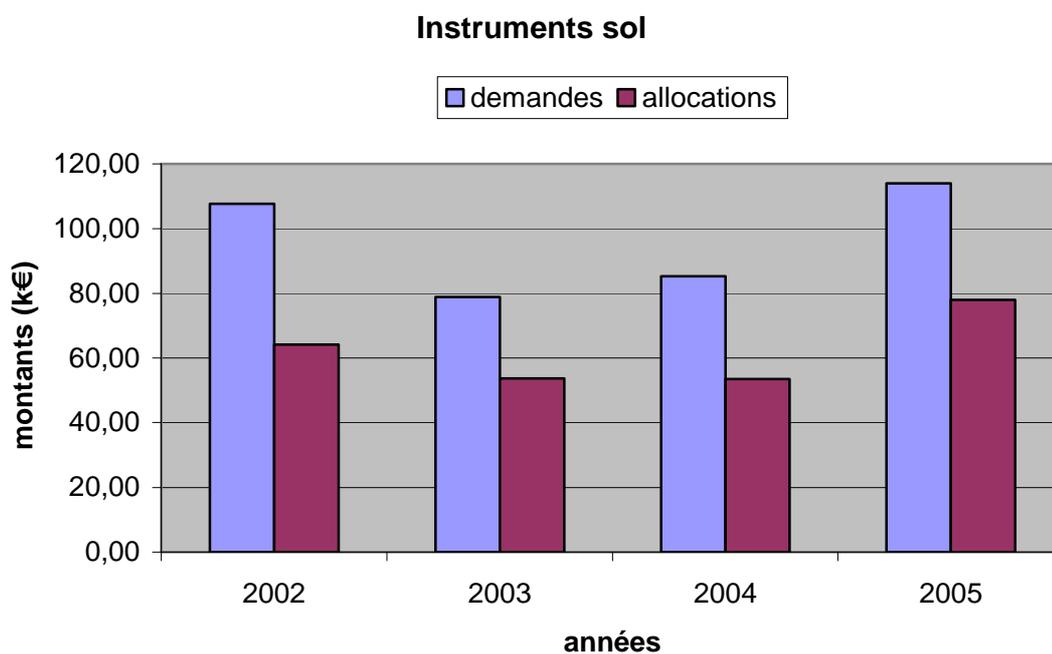


Figure 5b. Comparaison des demandes et des allocations pour les instruments au sol. Pression moyenne sur 4 années = 1,5.

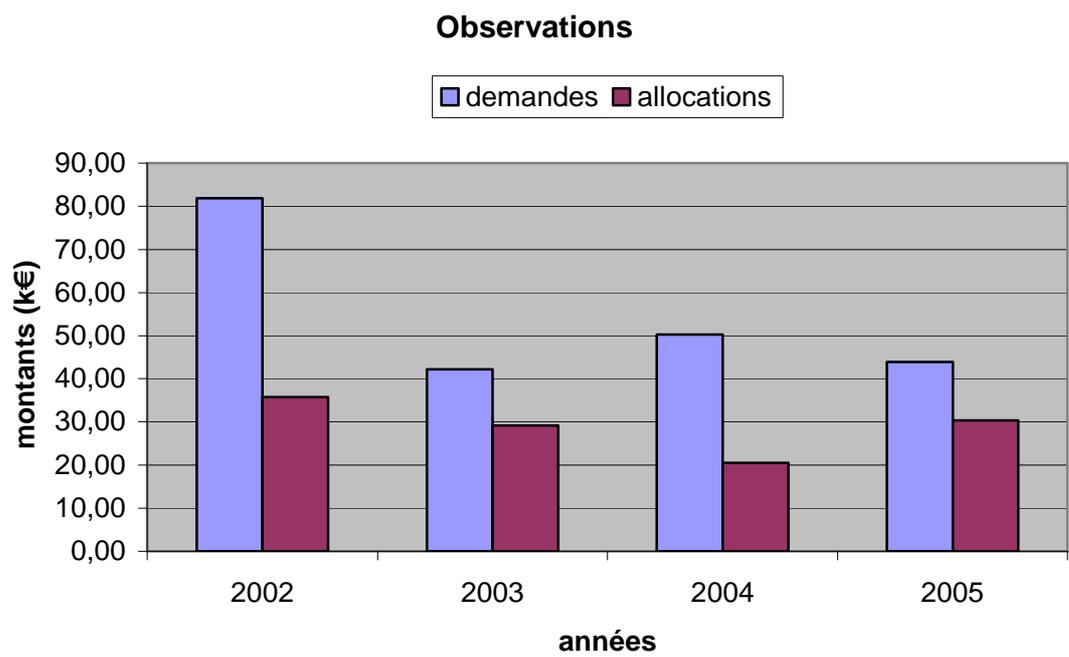


Figure 5c. Comparaison des demandes et des allocations pour les observations. Pression moyenne sur 4 années = 1,9.

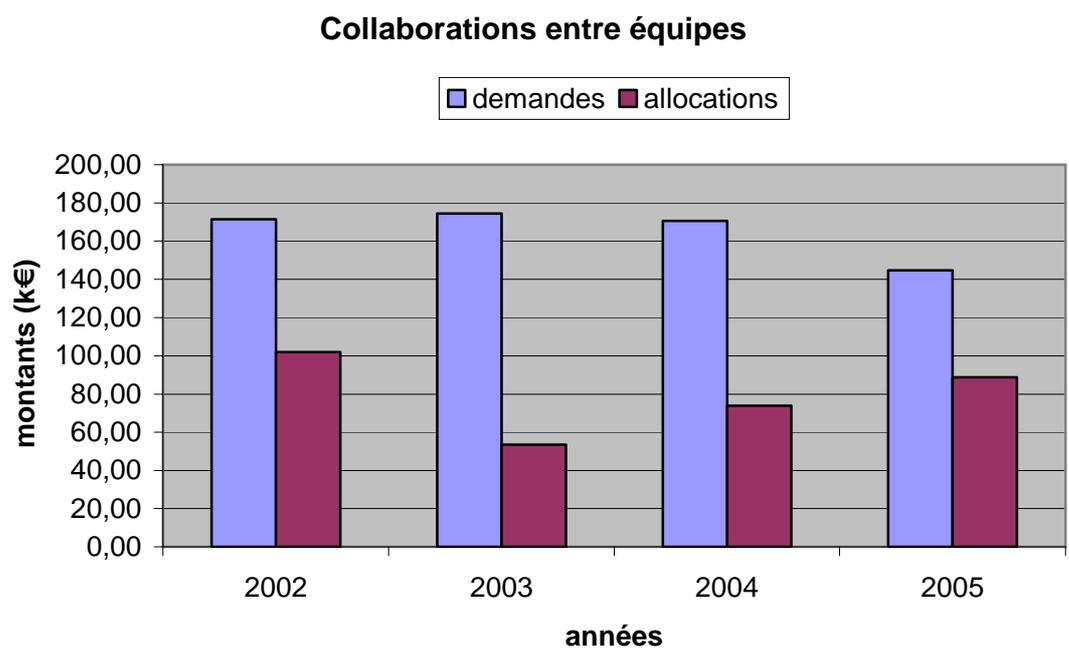


Figure 5d. Comparaison des demandes et des allocations pour les collaborations entre équipes. Pression moyenne sur 4 années = 2,1.

III. Ressources humaines

Les données collectées représentent la plus grande partie de la communauté participant aux activités du PNST car dix-neuf chercheurs appartenant effectivement à cette communauté ont échappé à ce recensement (oubli de 3 groupes de 4 ou 5 chercheurs, et 6 chercheurs « isolés » au sein d'autres équipes). L'effectif total recensé ici est en 2005 de 188 chercheurs, dont 5 honoraires, 5 éméritats, 116 permanents entre 26 et 65 ans dont 9 recrutés entre 2002 et 2005, 32 docteurs en attente de recrutement (catégorie « docteurs » dans le cartouche de la figure 6), et 30 doctorants.

La communauté PNST souffre de recrutements insuffisants en nombre, et la situation est alarmante comme le montre la pyramide des âges de la figure 6. La moyenne d'âge des chercheurs de 26 à 65 ans est de 51 ans en 2005, et la médiane est entre 55 et 56 ans. Dans l'hypothèse extrême d'une absence totale de recrutements à partir de 2006, la moyenne d'âge des 26-65 ans augmenterait jusqu'à 52 ans en 2009 avec un effectif réduit à 97 chercheurs.

Pourtant le flux de doctorants est là !

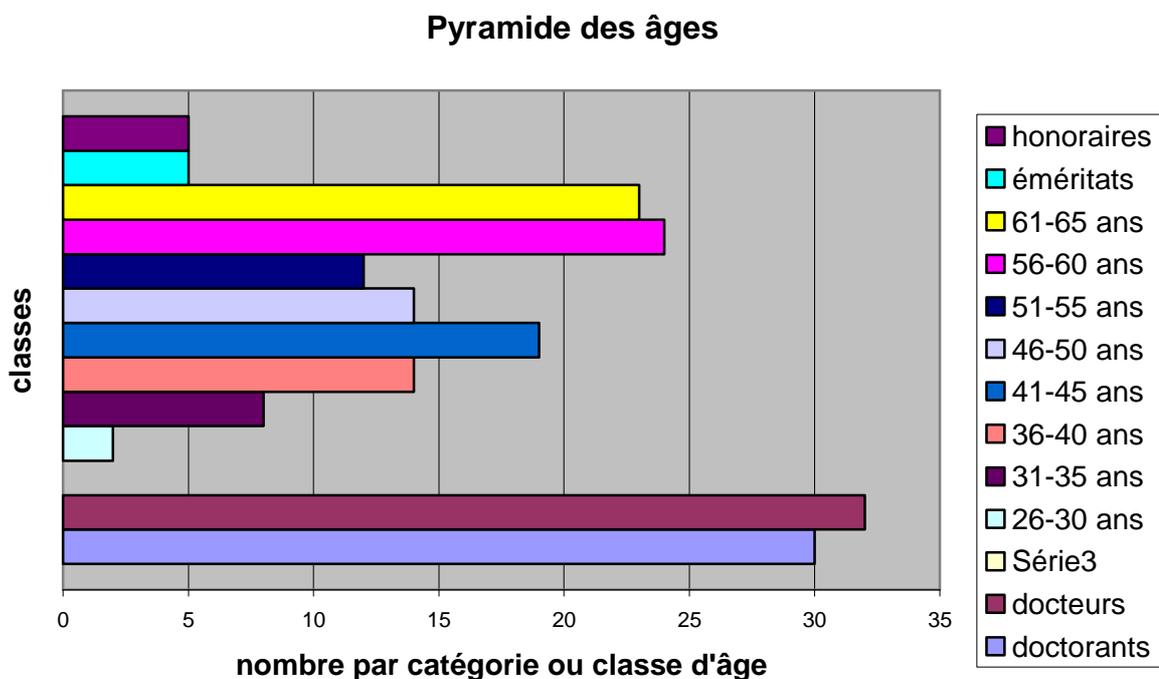


Figure 6. Pyramide des âges des chercheurs du PNST (188 chercheurs, dont 30 doctorants et 32 docteurs en attente de recrutement). La série 3, vide, ne correspond à aucune catégorie, elle a été introduite dans le seul but de ménager un espace entre les deux barres horizontales représentant le « vivier » de jeunes chercheurs contractuels et les autres barres représentant les chercheurs ayant un poste académique (CNRS, Université ou Observatoires).

IV. Analyse des publications de la communauté du PNST

[NB. Ce paragraphe est repris en introduction de la liste des publications données en annexe]

La liste des publications à comité de lecture comporte 531 articles publiés entre 2002 et 2005 ainsi que 20 articles soumis en 2005. Cette liste a été construite à partir des rapports d'activité des équipes financées par le PNST entre 2002 et 2005 : elle comprend également des articles publiés à partir d'analyse de données se trouvant dans les bases financées par le PNST ou résultant de l'organisation d'ateliers financés par le PNST.

Cette liste n'est pas exhaustive. Elle ne comprend pas en effet l'ensemble des publications de la communauté scientifique française exploitant par exemple les données de SOHO ou de CLUSTER (les équipes étant pour la plupart financées par le CNES). De même, elle ne comprend pas l'ensemble des publications autour du TGE THEMIS. Cette liste ne comprend pas non plus les publications liées à la thématique « magnétisme stellaire » qui a donné lieu à une cinquantaine de publications dans des revues à comité de lecture dans les quatre dernières années. Cette liste est donc un indicateur minorant de la production de la communauté.

Publications examinées par des comités de lecture

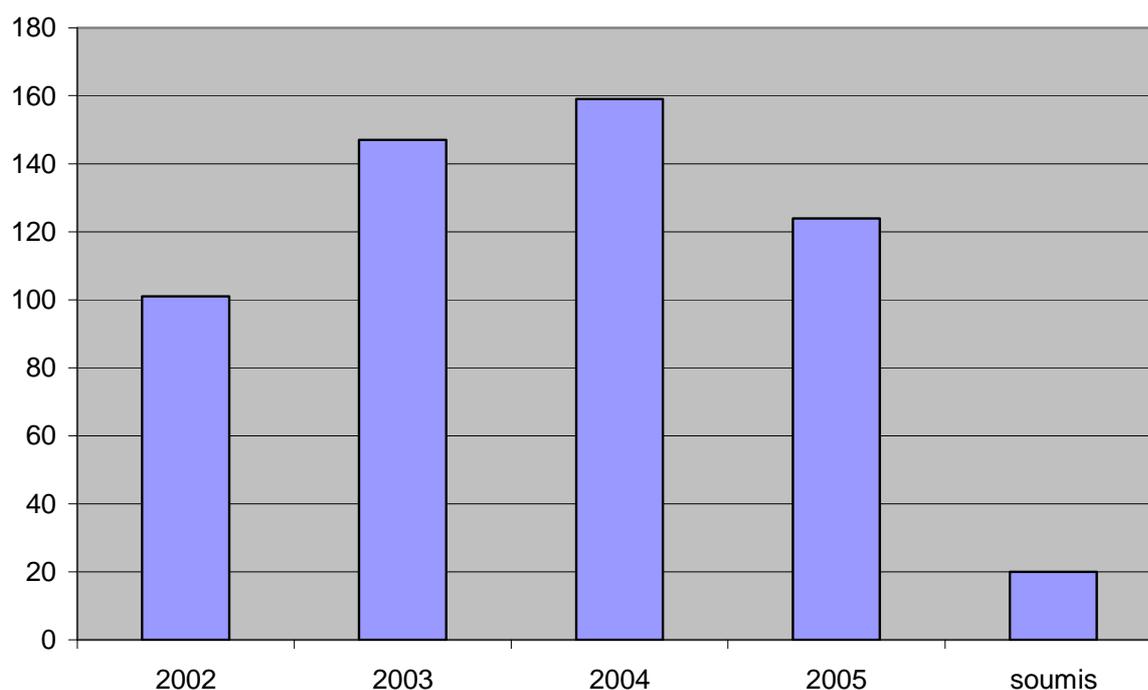


Figure 1. Nombre d'articles publiés par année dans des journaux à comité de lecture pendant la période 2002-2005 : les articles soumis en 2005 sont comptabilisés à part.

L'analyse de cette liste fournit une indication précieuse sur les journaux scientifiques ciblés par notre communauté. Douze journaux ont publié chacun plus de 6 articles de la communauté PNST dans la période 2002-2005 et ont publié ensemble 470 des 531 articles de la présente liste. La figure 2 montre que deux revues européennes occupent les deux premières places (*Astronomy and Astrophysics* et *Annales Geophysicae*), la troisième place revient à la revue américaine *Journal of Geophysical Research*, puis *Astrophysical Journal*, *Advances in Space Research* (la revue du COSPAR) et *Geophysical Research Letters* sont

pratiquement *ex aequo*. Ces six revues qui ont publié respectivement 19,6 , 18,5 , 14,3 , 7,8 , 7,6 , et 7,6% des publications listées dans ce document, collectent un peu plus de 75% des publications listées dans ce document.

Répartition des publications 2002-2005

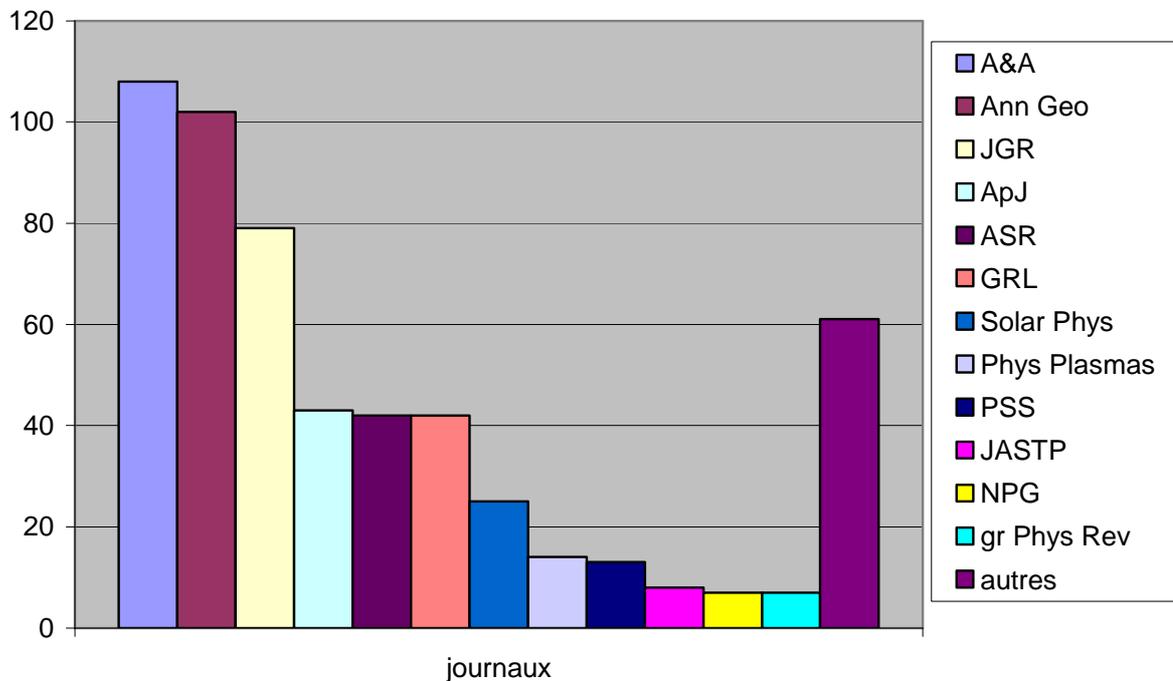


Figure 2. Distribution des publications sur les douze journaux principaux (plus de 6 publications pendant la période 2002-2005). Les articles publiés dans les autres journaux sont rassemblés dans la catégorie « autres ». Les principaux journaux sont dans l'ordre : *Astronomy and Astrophysics* (A&A), *Annales Geophysicae* (Ann Geo), *Journal of Geophysical Research* (JGR), *Astrophysical Journal* (ApJ), *Advances in Space Research* (ASR), *Geophysical Research Letters* (GRL), *Solar Physics* (Solar Phys), *Physics of Plasmas* (Phys Plasmas), *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* (JASTP), *Nonlinear Processes in Geophysics* (NPG) et le groupe des diverses collections de la *Physical Review* (gr Phys Rev). Cette statistique prend en compte les articles soumis en 2005.

Il est intéressant de constater que les six premières places reviennent à des revues généralistes qui recueillent 75% des publications de la communauté alors que deux revues dédiées au champ du PNST, *Solar Physics* et le *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, occupent respectivement les septième et dixième places. Mentionnons pour finir que cinq articles ont été publiés par *Space Science Reviews*.

V. Interfaces avec les autres programmes nationaux

La magnétosphère terrestre est une magnétosphère parmi d'autres dans le système solaire et les physiciens des plasmas qui étudient la physique magnétosphérique terrestre dans le cadre des relations Soleil-Terre participent généralement activement aux recherches, tant expérimentales que théoriques, menées sur les autres magnétosphères planétaires. De nombreux processus fondamentaux sont communs à tous les environnements des planètes magnétisées, voire même pour certains à toutes les planètes qu'elles soient magnétisées ou non. Les études de processus intervenant dans les environnements planétaires en général ressortissent au Programme National de Planétologie (PNP) et au PNST dans la mesure où ils interviennent aussi dans l'environnement terrestre, mais les études destinées à caractériser l'environnement ionisé d'une planète particulière autre que la Terre sont du ressort du seul PNP. Enfin l'étude du vent solaire et de l'héliosphère en général, y compris les couplages entre le plasma et les espèces neutres, qu'elles proviennent du milieu interstellaire ou des planètes géantes, est un thème du PNST. Telles sont les idées qui ont déterminé jusqu'à présent l'interface du PNP et du PNST : la communauté des plasmiciens a dans l'ensemble affirmé sa volonté de continuer à travailler dans ce cadre tout en souhaitant renforcer les échanges scientifiques sur ces thèmes au sein du PNST. Pendant la période 2002-2005 seulement deux demandes ont été soumises à l'interface avec le PNP, l'une concernant une étude comparative des ceintures de radiation de la Terre, de Jupiter et de Saturne (5k€ attribués pour 13,7 demandés) et l'autre l'organisation d'un atelier de travail sur la modélisation des interactions des planètes avec le vent solaire (3k€ alloués pour 5 demandés).

Le magnétisme solaire est un thème scientifique important du PNST et le cas de magnétisme stellaire le mieux documenté ; sa mise en perspective dans le magnétisme stellaire en général est fructueuse pour les communautés des programmes nationaux Soleil-Terre et Physique Stellaire et un petit groupe de chercheurs appartient aux deux communautés. Pendant la période 2002-2005 le PNST a soutenu partiellement quatre opérations sur les cinq qui lui ont été proposées (6k€ pour des diagnostics X de transport de matière et magnétisme à grande échelle dans les étoiles, 2k€ pour une étude de spectropolarimétrie stellaire par interférométrie, 4 k€ et 5k€ pour les spectropolarimètres stellaires ESPADONS et NARVAL). Le taux de financement des demandes à l'interface avec le PNPS a été de 48,6% (17k€ alloués pour 35 demandés) alors que le taux de financement des demandes de collaboration au sein du PNST a été en moyenne de 47,6%.

L'héliosismologie pourrait être une autre interface avec le PNPS, la question a été posée explicitement lors du colloque de prospective du PNST tenu en septembre dernier à l'IAP : l'argument principal étant qu'il faut considérer le Soleil comme un tout, les processus intervenant au cœur du Soleil, sous la tachocline, pouvant avoir une influence déterminante sur la zone convective et le magnétisme solaire. Le débat n'est pas clos et mérite plus ample réflexion : la position actuelle du CS du PNST est de considérer que les études héliosismologiques locales, qui permettent de sonder les « racines » des régions actives, ressortissent au PNST, mais que l'héliosismologie globale qui sonde le cœur du Soleil, ne présente pas aujourd'hui un lien suffisamment clair avec les relations Soleil-Terre pour être intégrée dans le périmètre scientifique du PNST. La difficulté provient du fait que le PNST est concerné par une bonne partie de la physique solaire dont les liens avec l'environnement terrestre sont patents, mais il n'est pas concerné par toute la physique solaire : les contours actuels du programme reflètent davantage notre compréhension actuelle des relations Soleil-Terre plutôt qu'une position dogmatique. La discussion de l'aplatissement du Soleil dans le cadre de la relativité générale, en liaison avec la mesure précise de la forme du Soleil et de ses

variations qui pourraient affecter l'irradiance solaire, est un autre exemple de recherche dont le PNST ne nie pas l'importance mais pour lequel il n'a pas présentement de motivation particulière.

Les contours scientifiques du PNST étant ce qu'ils sont aujourd'hui, il n'en demeure pas moins que le fonctionnement des programmes, du PNST entre autres, pourrait être amélioré sensiblement pour éviter la marginalisation des thèmes aux interfaces, en distinguant bien les expertises que les programmes sont amenés à faire et la distribution des ressources qu'ils gèrent. En ce qui concerne les allocations de ressources à des demandes aux interfaces, il serait souhaitable que les CS du PNST et du PNP (ou du PNSP) aient non seulement un membre commun, ce qui existe déjà, mais qu'il soit habilité à rapporter au CS qui se réunit en second la décision du CS qui s'est réuni le premier, alors qu'aujourd'hui les CS travaillent sans concertation sur ces demandes. Concernant les expertises ou le soutien à de grands projets aux interfaces, des avis émis en commun par deux programmes diminueraient peut être le risque de voir un projet intéressant recevoir deux soutiens réservés en raison d'un placement excentré par rapport à chacun des programmes.

Mentionnons enfin que de nombreux modélisateurs de la communauté PNST participent aux activités de l'ASSNA qui a pour vocation de structurer les projets numériques ambitieux qui émergent dans les différents domaines de l'astrophysique, même si la simulation numérique au sein du PNST paraît encore être le fait de petites équipes, voire de chercheurs isolés. C'est une des faiblesses de la communauté en dépit de l'excellence des travaux de modélisation conduits dans les différentes équipes.

Annexes

I. Thèses et Habilitations sur thématiques PNST 2002-2005

Thèses soutenues pendant la période 2002-2005

Aiouaz T., Etude de la structure du réseau chromosphérique solaire dans la région de transition, de sa relation avec le champ magnétique et son expansion dans la couronne", Thèse, Université Paris XI, Avril 2005

Ben el Hadj R, "Analyse des composants dynamiques de la zone de transition et de la couronne", Thèse, Université Paris XI, 2004

Bouhram M., Etude des échappements d'ions ionosphériques du côté jour des zones aurorales, Thèse de l'Université Paris 6 - Physique des Plasmas, Septembre 2002.

Buchlin, E., Signatures et modélisations du chauffage coronal turbulent à micro-échelles , Université Paris XI , Décembre 2004.

Cirigliano, D., Diagnostic du Plasma Protubérantielle à partir des données de la Mission SOHO", Université Paris XI, Octobre 2003.

Culot, F., Etude du rayonnement diurne émis à 557,7 nm et 630,0 nm par l'atome d'oxygène dans la thermosphère de la Terre : Analyse de données satellite et modélisation numérique. Université Joseph Fourier, Grenoble, Janvier 2005.

Derouich, M., Etude des collisions dépolarisant les raies du "deuxième spectre" du Soleil. Développement et exploitation d'une nouvelle méthode théorique", Université Paris VII - Denis Diderot, Juin 2004

El Bourki K., Développement d'un capteur de courant embarqué sur une fusée pour la mesure des courants en région aurorales, Thèse de l'Université de Versailles-Saint-Quentin, Janvier 2004.

Fruit G., Propagation des ondes MHD dans les couches de courant. Structure des modes et transferts énergétiques. Comparaison avec les données CLUSTER, Université Paul Sabatier Toulouse, Février 2003.

Hortin, T., Héliométrie chromosphérique et coronale; mesure de la rotation de l'atmosphère solaire , Thèse, Université Paris XI, Novembre 2003

Kretschmar M., Caractérisation et modélisation du flux solaire UV, Université Joseph Fourier, Grenoble,décembre 2002.

Lavraud B., Les cornets polaires extérieurs de la magnétosphère terrestre : Analyse des données de la mission, Université Paul Sabatier Toulouse, Janvier 2004.

Lefebvre, S., Déformées solaires: diamètre et structure interne: simulations en vue d'intercomparer les données sol et espace, Thèse, Université de Nice-Sophia Antipolis, 2003.

Marchaudon, A., Etude multi-instrumentale de la dynamique des structures aurorales côté jour et côté nuit : couplage avec la magnétosphère et le milieu interplanétaire, Thèse de l'Université de Versailles-Saint Quentin, Octobre 2003.

Moreau T., Etude analytique, numérique d'un spectromètre de masse embarquable, Université Paul Sabatier Toulouse, Mars 2003.

Pereira, F., Analyse spatio-temporelle du champ géomagnétique et des processus d'accélération solaires observés en émission radio, Université d'Orléans, Mars 2004.

Pitout, F., The polar cusp and its ionospheric footprint : dynamics and transients, co-encadrement Université Uppsala et Université Paul Sabatier, Toulouse, 2002.

Rincon, F., Dynamique des grandes échelles de la convection dans la photosphère solaire, Université Toulouse, Décembre 2004.

Sahraoui F., Etude des fluctuations magnétiques dans la magnétogaine terrestre : vers une interprétation dans le cadre d'une théorie de turbulence faible de la MHD - Hall, Thèse de l'Université de Versailles - Saint-Quentin, Mai 2003.

Scholl I, "Conception réalisation et utilisation d'archives de données solaires spatiales", Thèse, Université Paris 6, 2003.

Sorriso-Valvo, L., Intermittency in plasma turbulence, U. de Calabre, Janvier 2002.

Stenuit Hélène, Etude de la source solaire et des pertes de plasma de la magnétosphère terrestre à l'aide des satellites INTERBALL, Université Paul Sabatier Toulouse, Janvier 2002.

Vallat C., Etude du Courant Annulaire de la Magnétosphère terrestre à l'aide des données obtenues à bord des quatre satellites du projet Cluster , Université Paul Sabatier Toulouse, Décembre 2004.

Vallières, X., Les échelles de la turbulence de l'ionosphère des hautes latitudes et leurs signatures sur les échos des radars HF du réseau SuperDARN, Thèse de l'Université d'Orléans, Décembre 2002.

Vontrat-Réberac A., Etude des cornets polaire: Observations in-situ à haute altitude et modélisation des signatures ionosphériques, Thèse de l'Université de Versailles – Saint-Quentin, Juin 2003.

Zouganelis, I, Physique du vent solaire : Modèle cinétique et distributions non maxwelliennes, Paris 7, Septembre 2005

Bertucci C., Etude de l'interaction du vent solaire avec Mars : Implications sur les mécanismes d'échappement atmosphérique, Université Paul Sabatier Toulouse, Décembre 2003. (*à l'interface avec le PNP*)

Boqueho V., Etude de la transition collisionnelle - non collisionnelle dans les atmosphères planétaires; Application à Mars et Titan, Université Paul Sabatier, Septembre 2005. (*à l'interface avec le PNP*)

Cecconi, B., Etude des émissions radio des magnétosphères de Jupiter, Saturne, et la Terre avec l'expérience Radio de la mission Cassini, Université Paris VII, Avril 2004. (*à l'interface avec le PNP*)

Modolo R. , Modélisation de l'interaction du vent solaire, ou du plasma kronien, avec les environnements neutres de Mars et de Titan, Thèse de l'Université de Versailles - Saint-Quentin, Décembre 2004. (*à l'interface avec le PNP*)

Neiner, C., Pulsation, rotation vents et champs magnétiques dans les étoiles B, Université Louis Pasteur, Strasbourg, Octobre 2002. (*à l'interfaces avec le PNPS*)

Petit, P., Processus dynamo et rotation différentielle dans les étoiles de type solaire, Université Paul Sabatier Toulouse, Janvier 2003. (*à l'interfaces avec le PNPS*)

Thèses devant être soutenues d'ici la fin de l'année 2005

Alexandrova, O., Étude du choc terrestre avec les données des satellites CLUSTER et comparaison avec les résultats des simulations numérique de type hybride, Thèse, Université Paris 6, Décembre 2005.

Devoto P., Développement d'un spectromètre de masse pour la mesure de la composition des environnements plasma planétaires, Université Paul Sabatier; à soutenir en 2005.

Dolla, L., Accélération et chauffage des ions lourds dans le vent solaire rapide: modélisations et comparaisons expérimentales, Thèse, Université Paris XI, Décembre 2005.

Millard, A., IFTSUV : un spectromètre imageur à transformée de Fourier dans l'ultra-violet pour les prochaines missions spatiales solaires, Thèse, Université Paris XI, Décembre 2005

Thèses en cours

Attié D., Etude des ondes ULF observées par Cluster au voisinage de la magnétopause, Université de Versailles - Saint Quentin en Yvelines, début Octobre 2003.

Baerenzung, J., Effet dynamo et instabilités MHD, Université Nice Sophia-Antipolis, début Novembre 2004.

Beck, A. Modélisation N-corps d'un plasma, Université Paris , début Septembre 2005.

Bigot, B., Turbulence MHD anisotrope en physique solaire, Université Nice Sophia-Antipolis,

Bonnin, X., Etude stéréoscopique des sursauts radio solaires, Université Paris, début Septembre 2005.

Dauphin, C. Particules énergétiques dans les éruptions solaires : diagnostics X/gamma et radio, Université Paris VI, début septembre 2003.

Garcia G., Etude des électrons « runaway » dans l'ionosphère, Université de Paris 6, début Octobre 2004.

Grec, C., Etude de l'atmosphère solaire et de ses couches externes par des techniques à haute résolution angulaire et haute dynamique, Université de Nice-Sophia Antipolis, début Septembre 2005.

Grison B., Etudes des interactions ondes- particules dans les cornets polaires à l'aide des données de la mission Cluster, Thèse de l'Université de Paris 6, début Octobre 2002, soutenance prévue Janvier 2006.

Hurtaud, I., Modèle de couplage complet : thermosphère/ionosphère/magnétosphère, Université Paul Sabatier Toulouse

Léger L., Transfert de rayonnement multi-dimensionnel : application au spectre de HeI des protubérances solaires, Université Paul Sabatier Toulouse, début Septembre 2005.

Leroy P. , Magnétomètre spatial composite, continu et alternatif, Thèse de l'Université de Versailles – Saint Quentin, début Octobre 2003, soutenance prévue Octobre 2006.

Lointier, G., Suivi des régions frontières de la magnétosphère à partir des radars SuperDARN, Université d'Orléans, soutenance prévue en 2007.

Maggiolo, R., Etude des accélérations ioniques à hautes latitudes à partir des données CLUSTET, Université Paul Sabatier Toulouse

Maharakhaka, S., Exploitation des données de STEREO/SECCHI, , Université Paris XI, début Septembre 2005.

Matteini, F., Expansion du vent solaire, Université Paris en cotutelle avec l'Université de Florence, début Septembre 2005.

Moutoussamy Joël, Nouveaux fluxmètres spatiaux à large bande, Université de Versailles - Saint-Quentin , début Octobre 2003

Pariat, E., Injection de flux et d'hélicité magnétiques dans l'atmosphère solaire, Université Paris VII, début septembre 2003.

Pouget, G., Analyse de structures magnétiques solaires observées à partir de la sonde solaire SOHO et du télescope THEMIS: oscillations, diagnostic, instabilités, Université Paris XI, soutenance prévue fin 2006

Ramirez, J., Mesure de champs magnétiques solaire et stellaires, Université Paris VI, début septembre 2004.

Rondi, S., Acquisition de données rapides pour la caméra CALAS : Applications à l'étude de la supergranulation , Université Toulouse, début Janvier 2004

Sampoorna, M., Polarized Line formation in turbulent and moving media, cotutelle Université Nice Sophia-Antipolis et Bangalore, Inde

Simon C., Etudes des entrées d'énergie dans l'ionosphère terrestre, Université Joseph Fourier, Grenoble, soutenance prévue en juin 2006.

Stverak, S., Evolution radiale des fonctions de distributions des électrons dans le vent solaire, Université Paris en cotutelle avec l'Université de Prague, début Septembre 2005

Teste A., Accélération de particules dans la magnétosphère polaire d'après les observations de Cluster, Thèse de l'Université de Paris 6, Début Octobre 2004

Tkaczuk, R. Contrainte sur la dynamique des grandes échelles solaires grâce à l'imagerie grand champ haute résolution, Université Toulouse, début Septembre 2003.

Troseille, C. Préparation de l'expérience VIM sur Solar Orbiter, Université Paris XI, début Septembre 2005.

Garnier, P., Etude de l'interaction Titan/Saturne à l'aide de l'imagerie magnétosphérique (MIMI/Cassini), Université Paul Sabatier, Toulouse (*à l'interface avec le PNP*)

Hess, S., Modélisation de l'interaction Io/Jupiter, Université Paris VI, Octobre 2005
(*à l'interface avec le PNP*)

Lamy, L., Emissions radio de Saturne sur Cassini, Université Paris VI, début Octobre 2005.
(*à l'interface avec le PNP*)

Schippers, P., Sources et pertes de particules dans la magnétosphère de Saturne (CAPS/Cassini), Université Paul Sabatier, Toulouse. (*à l'interface avec le PNP*)

Habilitations :

Bocchialini, K. Structure et dynamique de l'atmosphère solaire : le règne de SOHO, Habilitation, Université Paris XI, 2004.

Galtier, S., Turbulence et plasmas spatiaux anisotropes : applications à la physique solaire, Habilitation, Université Paris XI, 2003.

Forme F., Turbulence électrostatique basse fréquence dans l'ionosphère terrestre, Université de Versailles - St Quentin en Yvelines, Janvier 2003.

Savoini Philippe, Etude des frontières et interfaces à la magnétosphère terrestre : utilisation de la simulation numérique, Université Paris VI Pierre et Marie Curie, Décembre 2004.

Quémerais, Eric, Etude du fond UV interplanétaire: exemples d'applications à l'étude des flux de masse du vent solaire, à l'interface héliosphérique et à la météorologie de l'espace, UPMC, janvier 2004.

II. Publications examinées par des comités de lecture

1. Analyse des publications de la communauté du PNST

La liste des publications à comité de lecture comporte 531 articles publiés entre 2002 et 2005 ainsi que 20 articles soumis en 2005. Cette liste a été construite à partir des rapports d'activité des équipes financées par le PNST entre 2002 et 2005 : elle comprend également des articles publiés à partir d'analyse de données se trouvant dans les bases financées par le PNST ou résultant de l'organisation d'ateliers financés par le PNST.

Cette liste n'est pas exhaustive. Elle ne comprend pas en effet l'ensemble des publications de la communauté scientifique française exploitant par exemple les données de SOHO ou de CLUSTER (les équipes étant pour la plupart financées par le CNES). De même, elle ne comprend pas l'ensemble des publications autour du TGE THEMIS. Cette liste ne comprend pas non plus les publications liées à la thématique « magnétisme stellaire » qui a donné lieu à une cinquantaine de publications dans des revues à comité de lecture dans les quatre dernières années. Cette liste est donc un indicateur minorant de la production de la communauté.

Publications examinées par des comités de lecture

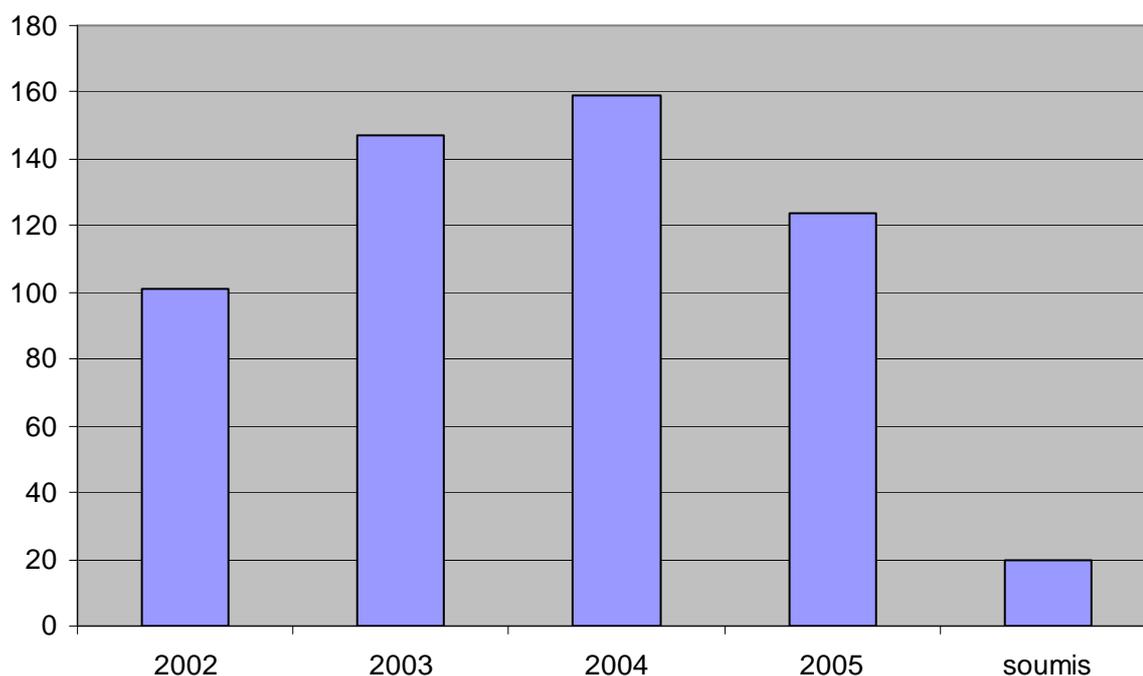


Figure 1. Nombre d'articles publiés par année dans des journaux à comité de lecture pendant la période 2002-2005 : les articles soumis en 2005 sont comptabilisés à part.

L'analyse de cette liste fournit une indication précieuse sur les journaux scientifiques ciblés par notre communauté. Douze journaux ont publié chacun plus de 6 articles de la communauté PNST dans la période 2002-2005 et ont publié ensemble 470 des 531 articles de la présente liste. La figure 2 montre que deux revues européennes occupent les deux premières places (*Astronomy and Astrophysics* et *Annales Geophysicae*), la troisième place revient à la revue américaine *Journal of Geophysical Research*, puis *Astrophysical Journal*, *Advances in Space Research* (la revue du COSPAR) et *Geophysical Research Letters* sont pratiquement *ex aequo*. Ces six revues qui ont publié

respectivement 19,6 , 18,5 , 14,3 , 7,8 , 7,6 , et 7,6% des publications listées dans ce document, collectent un peu plus de 75% des publications listées dans ce document.

Répartition des publications 2002-2005

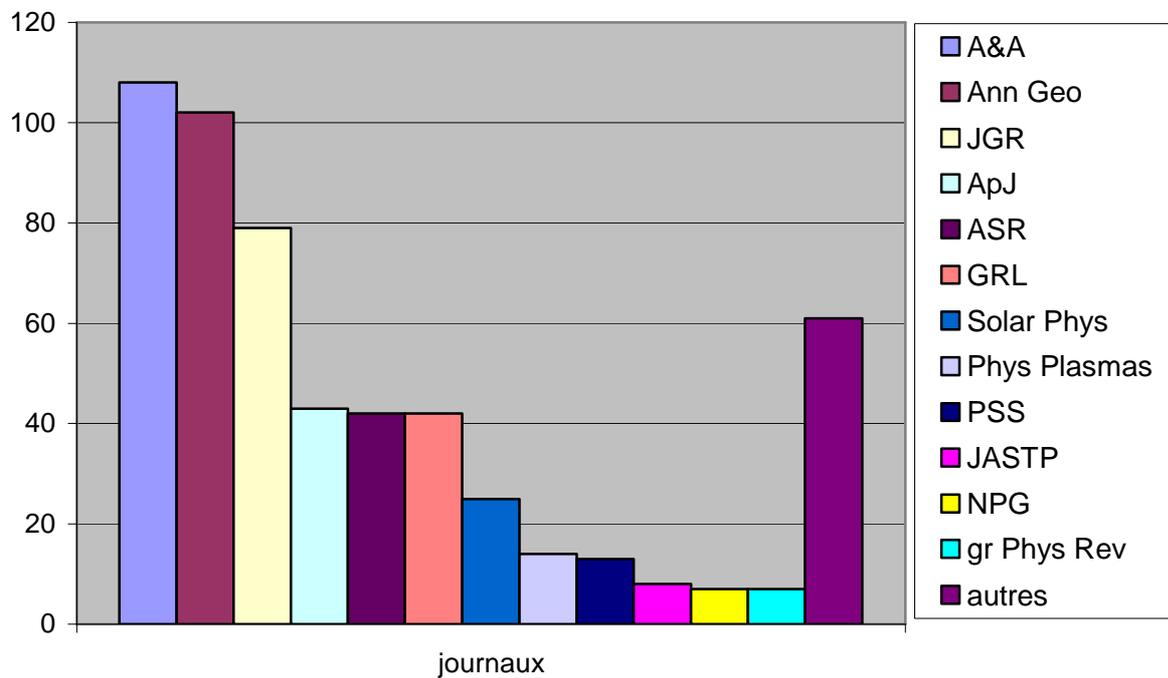


Figure 2. Distribution des publications sur les douze journaux principaux (plus de 6 publications pendant la période 2002-2005). Les articles publiés dans les autres journaux sont rassemblés dans la catégorie « autres ». Les principaux journaux sont dans l'ordre : *Astronomy and Astrophysics* (A&A), *Annales Geophysicae* (Ann Geo), *Journal of Geophysical Research* (JGR), *Astrophysical Journal* (ApJ), *Advances in Space Research* (ASR), *Geophysical Research Letters* (GRL), *Solar Physics* (Solar Phys), *Physics of Plasmas* (Phys Plasmas), *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* (JASTP), *Nonlinear Processes in Geophysics* (NPG) et le groupe des diverses collections de la *Physical Review* (gr Phys Rev). Cette statistique prend en compte les articles soumis en 2005.

Il est intéressant de constater que les six premières places reviennent à des revues généralistes qui recueillent 75% des publications de la communauté alors que deux revues dédiées au champ du PNST, *Solar Physics* et le *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, occupent respectivement les septième et dixième places. Mentionnons pour finir que cinq articles ont été publiés par *Space Science Reviews*.

2. Publications 2002

André, R., M. Pinnock, A.S. Rodger, J.-P. Villain, and C. Hanuise (2002), Classifying SuperDARN autocorrelation functions, *Ann. Geophysicae*, 20(11), 1783-1793

Aschwanden, M.J. and Charbonneau, P., (2002), "Effects of Temperature Bias on Nanoflare Statistics", *ApJ* 566, L59-L62

Aschwanden, M.J. and Parnell, C.E., (2002), "Nanoflare statistics from first principles: fractal geometry and temperature synthesis", *ApJ*, 572, Issue 2, pp. 1048-1071

Aulanier G., DeVore C.R., Antiochos S.K. (2002), Prominence magnetic dips in sheared arcades, *ApJ*, 567, L97

Aulanier G., Schmieder B. (2002), The magnetic nature of wide EUV filament channels and their role in the mass loading of CMEs, *Astronomy and Astrophysics* 386, 1106

Benz A.O., P. St Hilaire, N. Vilmer (2002), Location of narrowband spikes in solar flares, *Astron. Astrophys.*, 388, 363

Berthomier M., Muschetti L., Bonnell J., Roth I., Carlson C. (2002) Interaction between electrostatic whistlers and electron holes in the auroral region. *Journal of Geophysical Research*. ISSN : 0148-0227. , vol. 107, n. 12, 11 p. , doi:10.1029/2002JA009303.

Bleybel, A., Amari, T., van Driel-Gesztelyi, L., Leka, K.D. (2002), Global budget for an eruptive active region. I. Equilibrium reconstruction approach, *A&A*, 395, 685

Bommier V., Molodij G. (2002), Some THEMIS-MTR observations of the second solar spectrum (2000 campaign), *Astronomy and Astrophysics* 381, 241

Bommier V., Rayrole J. (2002), Search for polarimetric sensitivity in the first observations with THEMIS spectropolarimetric mode MTR (August 1998 campaign), *Astronomy and Astrophysics* 381, 227

Borodkova, N.L., Yahnin A.G., Liou, K., Sauvaud J. A., Fedorov A.O., Lutsenko V.N., Nozdrachev M.N., Lyubchich A. A., "Plasma sheet fast flows and auroral dynamics during substorm: a case study", *Ann. Geophys.*, vol. 20, Issue 3, pp.341-347, 2002.

Bosqued J.M. (2002), Evidence for the interplanetary electric potential? WIND observations of electrostatic fluctuations, *Ann. Geophys.*, 20, 609

Bouhram M., Dubouloz N., Malingre M., Jasperse J. R., Pottelette R., Senior C., Delcourt D., Carlson C. W., Roth I., Berthomier M., Sauvaud J. A., "Ion outflow and associated perpendicular heating in the cusp observed by Interball Auroral Probe and Fast Auroral Snapshot", *J. Geophys. Res. (Space Physics)*, Volume 107, Issue A2, pp. SMP 4-1, 2002

Bouhram M., Dubouloz N., Hamelin N., Grogoriev S.A., Malingre M., Torkar K., Vezolov M.V., Galperin Y., Hanasz J., Perraut S., Schrieber S., Zinin L. (2002) Electrostatic interaction between Interball-2 and the ambient plasma. 1 Determination of the spacecraft potential from current calculations. *Annales Geophysicae*. ISSN : 0992-7689. , vol. 20, n. 3, 12 p. , pp. 365-376.

Bouhram, M., N. Dubouloz, M. Malingre, R. Pottelette, C. Senior, D. Delcourt, C. W. Carlson, I. Roth, M. Berthommier and J.A. Sauvaud (2002), Ion outflow and associated lower hybrid perpendicular heating observed by Interball-2 and FAST, *J. Geophys. Res.*, 107, 1023

Brain, D.A., F. Bagenal, M.H. Acuña, J.E.P. Connerney, D.H. Crider, C. Mazelle, H. Rème, and D.L. Mitchell (2002), Observations of low frequency electromagnetic plasma waves upstream from the Martian shock, *J. Geophys. Res.*, Volume 107, Issue A6, 9-1

Buzulukova N. Y., Galperin Y. I., Kovrazhkin R. A., Glazunov A. L., Vladimirova G. A., Stenuit H., Sauvaud J. A., Delcourt D. C., "Two types of ion spectral gaps in the quiet inner magnetosphere: Interball-2 observations and modeling", *Ann. Geophys.*, vol. 20, Issue 3, pp.349-364, 2002.

Chaston C., Bonnel J., Carlson C., Berthomier M., Peticolas L., Roth I., Ergun N. R., McFadden J. (2002) Electron acceleration in the ionospheric Alfvén resonator. *Journal of Geophysical Research*. ISSN : 0148-0227. , vol. 107, n. 11, 16 p. , doi:10.1029/2002JA009272.

Delcourt D. (2002) Particle acceleration by inductive electric fields in the inner magnetosphere. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. ISSN : 1364-6826. , vol. 64, n. 5-6, 9 p. , pp. 551-559.

Démoulin P., Mandrini C.H., van Driel-Gesztelyi L., López Fuentes M.C. & Aulanier, G. (2002), The magnetic helicity injected by shearing motions, *Solar Physics*, 207, 85

Démoulin P., van Driel-Gesztelyi L., Mandrini C.H., Thompson B., Plunkett S., Kóvári Zs., Aulanier, G. & Young A. (2002), What is the source of the magnetic helicity shed by CMEs ? The long-term helicity budget of AR 7978, *A&A*, 382, 650

Deng Y.Y., Lin Yong, Schmieder B., Engvold O. (2002), Filament activation and magnetic reconnection, *Solar Physics*, *Solar Phys.*, 209, 153

Dubinin E., Skalsky A., Song P., Savin S., Kozyra J., Moore T. E., Russell C. T., Chandler M. O., Fedorov A., Avakov L., Sauvaud J. A., Friedel R. H. W., "Polar-Interball coordinated observations of plasma and magnetic field characteristics in the regions of the northern and southern distant cusps", *J. Geophys. Res. (Space Physics)*, Volume 107, Issue A5, pp. SMP 2-1, 2002.

Dubinin, E.M., Sauer K., McKenzie J.F., and G. Chanteur, Nonlinear waves and solitons propagating perpendicular to the magnetic field in bi-ion plasma with finite plasma pressure, *Nonlinear Processes in Geophysics*, Vol. 9, pp 87-99, 2002

Eastwood J. P., Balogh A., Dunlop M. W., Horbury T. S., Dandouras J., "Cluster observations of fast magnetosonic waves in the terrestrial foreshock", *Geophys. Res. Lett.*, Volume 29, Issue 22, pp. 3-1, 2002.

Eibe M.T., Aulanier G., Faurobert M., Mein P., Malherbe J.M. (2002), Vertical structure of sunspots from THEMIS observations, *Astronomy and Astrophysics* 381, 290

Faurobert M., Arnaud J. (2002), Scattered polarization of molecular emission lines in the quiet solar chromosphere, *Astronomy and Astrophysics* 382, L17

Fedorov A., E. Budnik, and J. A. Sauvaud, "Interconnection of the high-latitude and low-latitude boundary layers when IMF By is dominant", *Adv. Space Res.*, V.30, N12, 2002.

Filippov, B. and Koutchmy, S. (2002), About the prominence heating mechanisms during its eruptive phase, *Solar Physics*, 208, pp.283- 293

Fontaine D. (2002) Structure and dynamics of the earth's polar ionosphere: recent results inferred from incoherent scatter sounders. *Plasma Sources Science and Technology*. ISSN : 0963-0252. , vol. 11, n. 3A, 7 p. , pp. A113-A119.

Fruit, G., P. Louarn, A. Tur, D. Le Quéau, (2002), Propagation of MHD perturbations in a Harris current sheet. 1- discrete modes, *J. Geophys. Res.*, 107, 39-1

Fruit G., Louarn P., Tur A., Le Quéau D., "On the propagation of magnetohydrodynamic perturbations in a Harris-type current sheet: 2. Propagation on continuous modes and resonant absorption", *J. Geophys. Res. (Space Physics)*, Volume 107, Issue A11, pp. SMP 40-1, 2002

Gabriel A. H., Baudin, F., Boumier P., García R. A., Turck-Chièze S., Appourchaux T., Bertello L., Berthomieu G., Charra J., Gough D. O., Pallé P. L., Provost J., Renaud C., Robillot J.-M., Roca Cortés T., Thiery S., Ulrich R. K., (2002), « A search for solar g modes in the GOLF data », *Astronomy and Astrophysics*, v.390, p.1119-1131

Galtier, Nazarenko, Newell & Pouquet (2002), Anisotropic Turbulence of Shear-Alfvén Waves, *ApJ* 564, L49

Georgoulis M., Bernasconi P., Rust D., Schmieder B. (2002), Statistical and morphology properties of Ellerman bombs, *ApJ*, 575, 506

Gibson, S., Fletcher L., Del Zanna G., Pike C.D., Mason H.E., Mandrini C.H., Démoulin P., Gilbert H., Burkepile J., Holzer T., Alexander, D., Liu Y., Nitta N., Qiu J., Schmieder B., Thompson B.J. (2002), The structure and evolution of a sigmoidal active region, *ApJ*, 574, 1021

Grappin, R. (2002), Comment on "Alfvénic turbulence in the polar wind" by Bavassano, Pietropaolo and Bruno, *J. Geophys. Research*, 107, 1247

Grappin, R.; Léorat, J.; Habbal, S. Rifai (2002), Large-amplitude Alfvén waves in open and closed coronal structures: A numerical study, *J. Geophys. Res.* 107, 1380

Green L.M., López Fuentes M., Mandrini C.H., Démoulin P., van Driel-Gesztelyi L., Culhane J.L., (2002), The magnetic helicity budget of a CME-prolific active region, *Solar Physics*, 208, 43

Green L.M., S.A. Matthews, L.van Driel-Gesztelyi, L.K.Harra, J.L., Culhane, (2002), Multi-wavelength observations of an X-class flare without a coronal mass ejection, *Solar Physics* 205, 325

Gurnett D. A., Kurth W. S., Hospodarsky G. B., Persoon A. M., Zarka P., Lecacheux A., Bolton S. J., Desch M. D., Farrell W. M., Kaiser M. L., Ladreiter H.-P., Rucker H. O., Galopeau P., Louarn P., Young D. T., Pryor W. R., Dougherty M. K., "Control of Jupiter's radio emission and aurorae by the solar wind", *Nature*, Volume 415, Issue 6875, pp. 985-987, 2002.

Hamelin M., Bouhram M., Dubouloz N., Malingre M., Grigoriev S.A., Zinin L.V. (2002) Electrostatic interaction between Interball-2 and the ambient plasma. 2. Influence on the low energy ion measurements with Hyperboloid. *Annales Geophysicae*. ISSN : 0992-7689. , vol. 20, n. 3, pp. 377-390.

Karlicky, M. and Hénoux, J.-C (2002), Impact Ha polarization and return currents, *A&A*, 383, 713-718

Kerkeni, B., and V. Bommier (2002), Theoretical study of the collisional depolarization and of the Hanle effect in the Na I D2 line observed on the solar limb, *Astron. Astrophys.*, 394, 707-715

Khan, J.I., N. Vilmer., P. Saint-Hilaire, A.O. Benz (2002), The solar coronal origin of a slowly drifting decimetric-metric pulsation structure, *Astron. Astrophys.*, 388, 363

Kistler L. M., Frey H. U., Möbius E., Mouikis C., Quinn J. M., Klecker B., Rème H., Bosqued J. M., Dandouras J., Sauvaud J. A., Di Lellis A. M., Formisano V., Marcucci M. F., Carlson C. W., McFadden J. P., Parks G. K., McCarthy M., Korth A., Eliasson L., Lundin R., Paschmann G., Popecki M. A., Mende S. B., Winningham J. D., Fazakerley A. N., "Motion of auroral ion outflow structures observed with CLUSTER and IMAGE FUV", *J. Geophys. Res. (Space Physics)*, Volume 107, Issue A8, pp. SMP 17-1, 2002

- Klein K.-L., Z. Mouradian (2002), The dynamics of an erupting prominence, *Astron. Astrophys.*, 381, 683
- Krasnoselskikh V., O. Podladchikova, B. Lefebvre, N. Vilmer (2002), Quiet Sun coronal heating: a statistical model, *Astron. Astrophys.*, 382, 699
- Lacombe, C., C. Salem, A. Mangeney, D. Hubert, C. Perche, J.-L. Bougeret, P.J. Kellog, and J.-M. Bosqued (2002), Evidence for the interplanetary electric potential? WIND observations of electrostatic fluctuations, *Ann. Geophys.*, 20, 609
- Lathuillère C., W. Gault, B. Lamballais, Y. J. Rochon et B. Solheim, (2002), Doppler Temperatures from O1D airglow in the daylight thermosphere as observed by the WINDII interferometer on board the UARS satellite, *Annales Geophysicae*, 20, 203-212
- Lathuillère C., Menvielle, M., Lilensten, J., Amari, T. et S. M. Radicella, (2002), From the Sun's atmosphere to the Earth's atmosphere : an overview of scientific models available for space weather developments, *Annales Geophysicae* 20, 1081-1104
- Laveder, D., Passot, T., and P.L. Sulem, Transverse dynamics of dispersive Alfvén waves: I. Direct numerical evidence of filamentation, *Phys. Plasmas*, 9, 293-304, 2002.
- Laveder, D., Passot, T., and P.L. Sulem (2002), Transverse dynamics of dispersive Alfvén waves: II. Driving of a reduced MHD flow, *Phys. Plasmas*, 9, 305
- Lavraud B., Dunlop M. W., Phan T. D., Rème H., Bosqued J. M., Dandouras J., Sauvaud J. A., Lundin R., Taylor M. G. G. T., Cargill P. J., Mazelle C., Escoubet C. P., Carlson C. W., McFadden J. P., Parks G. K., Moebius E., Kistler L. M., Bavassano-Cattaneo M.-B., Korth A., Klecker B., Balogh A., "Cluster observations of the exterior cusp and its surrounding boundaries under northward IMF", *Geophys. Res. Lett.*, Volume 29, Issue 20, pp. 56-1, 2002.
- Lemaire P., Artzner G., Vial J.-C., Curdt W., Schühle U., Wilhelm K., (2002), "Transition region quiet sun velocity field evolution", *Advances in Space Research*, Volume 30, Issue 3, p. 487-490
- Lemaire P., Emerich C., Vial J.-C., Curdt W., Schühle U., Wilhelm K., (2002), "Variation of the full Sun hydrogen Lyman profiles through solar cycle 23", *Advances in Space Research*, Volume 35, Issue 3,
- Lembege B. and P. Savoini (2002), Formation of reflected electrons bursts by the nonstationarity and nonuniformity of a collisionless shock front, *J. Geophys. Res.*, 107, 3, 1-18
- Lembege B., (2002), Full particle electromagnetic simulations of collisionless shocks (review) in the book "Space Plasma Simulation", Ed. Buchner, C.T. Dum and M. Scholer, Springer, pp. 54-78
- Lilensten J., Blet P. L., "The TEC and F2 parameters as tracers of the ionosphere and thermosphere", *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Volume 64, Issue 7, p. 775-793., 2002.
- López Ariste, A. & Casini, (2002), Magnetic Fields in Prominences: Inversion Techniques for Spectropolarimetric Data of the He I D3 Line, *Astrophysical Journal*, 575, 529
- Madjarska M. S., Doyle J. G., (2002), "Temporal evolution of different temperature plasma during explosive events", *Astronomy and Astrophysics*, 382, p.319-327
- Malandraki O. E., E. T. Sarris, P. Trochoutsos, G. Tsiropoula, M. Pick (2002), Solar energetic particles inside a coronal mass electron event observed with the ACE spacecraft, *Journal of ASTP*, 64, 517-525

- Malherbe J.-M (2002), Vertical structure of sunspots from THEMIS observations, *Astron. and Astrophys.*, 381, 290
- Mandrini C.H., Démoulin P., Schmieder B., Deng Y.Y., Rudawy P. (2002), The role of bald patches in chromospheric events, *A&A*, 391, 317
- Mangeney, A., F. Califano, C. Cavazzoni and P. Travnicek (2002), A Numerical Scheme for the Integration of the Vlasov-Maxwell System of Equations, *Journal of Computational Physics*, 179, 495-538
- Marqué, Ch., P. Lantos, J. P. Delaboudinière (2002), Multi wavelength investigation of the eruption of a sigmoidal quiescent filament, *A&A* , 387, 317-325
- Mein P. (2002), The MSDP of THEMIS: capabilities, first results and prospects, *A&A*, 381, 271
- Muschetti L., Roth I., Carlson C., Berthomier R M. (2002) Modeling stretched solitary waves along magnetic field lines. *Nonlinear Processes in Geophysics*. ISSN : 1023-5809. , vol. 9, n. 2, 9 p. , pp. 101-109.
- Nagendra, K. N., H. Frisch, and M. Faurobert (2002), Hanle effect with angle-dependent partial redistribution, *Astron. Astrophys.*, 395, 305-320
- Nakamura R., Baumjohann W., Klecker B., Bogdanova Y., Balogh A., Rème H., Bosqued J. M., Dandouras J., Sauvaud J. A., Glassmeier K.-H., Kistler L., Mouikis C., Zhang T. L., Eichelberger H., Runov A., "Motion of the dipolarization front during a flow burst event observed by Cluster", *Geophys. Res. Lett.*, Volume 29, Issue 20, pp. 3-1, 2002.
- Nakamura R., Baumjohann W., Runov A., Wolwerk M., Zhang, T.L., Klecker B., Bogdanova Y., Roux A., Balogh, Reme H., Sauvaud J.A., Frey H.U. (2002) Fast flow during current sheet thinning. *Geophysical Research Letters*. , vol. 29.
- Nishitani, N., T. Ogawa, N. Sato, H. Yamagishi, M. Pinnock, J.-P. Villain, G. J. Sofko, and O. Troshichev (2002), A study of the afternoon convection cell's response to an IMF southward turning, *J. Geophys. Res.*, 10, 1029
- Patsourakos & Vial (2002), Intermittent behavior in the transition region and the low corona of the quiet Sun, *A&A* 385, 1073-1076
- Peymirat C., A. D. Richmond, and R. G. Roble, (2002), Neutral wind influence on the electrodynamic coupling between the ionosphere and the magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, 107, A1, 10.1029
- Pitout F., Newell P. T., Buchert S. C., "Simultaneous high- and low-latitude reconnection: ESR and DMSP observations", *Ann. Geophys.*, Volume 20, Issue 9, pp.1311-1320, 2002.
- Raouafi N.-E., Sahal-Bréchet S., Lemaire P., (2002), « Linear polarization of the O VI lambda 1031.92 coronal line. II. Constraints on the magnetic field and the solar wind velocity field vectors in the coronal polar holes », *Astronomy and Astrophysics*, .396, p.1019-1028
- Régnier, S., Amari, T., et Kersale, E., (2002), Coronal magnetic field from vector magnetographs: non constant alpha force-free configuration of the active region NOAA 8151, *Astronomy and Astrophysics*, 392, 3, 1119-1127.
- Santolik O., Pickett J.S., Gurnett D.A., Maksimovic M. , Cornilleau-Wehrlin N. (2002) Spatio-temporal variability and propagation of equatorial noise observed by Cluster. *Journal of Geophysical Research*. ISSN : 0148-0227. , vol. 107, n. A12, doi:10.1029/2001JA009159.

Schmieder, B., Van Driel-Gesztelyi, L., Aulanier, G., Démoulin, P., Thompson, B., DeForest, C., Wiik, J. E., Saint Cyr, C., Vial, J. C. (2002), Relationships between CME's and prominences, *Adv. Space Research*, 29, 1451

Schmieder, B., Tziotziou, K., Heinzel, P., Malherbe, J.M., Curdt, W. (2002), Filament absorption analysis using THEMIS and SOHO/CDS-SUMER coordinated observations, *Nuevo Cimento*, Vol. 25, 775

Senior, C., J.-C. Cerisier, A. Thorolfsson, M. Lester (2002), Propagation of ionospheric convection changes following a sharp IMF transition, *J. Geophys. Res.*, 107(10),1044

Senior, C., J.-C. Cerisier, F. Rich, M. Lester, G. K. Parks (2002), Strong sunward propagating flow bursts in the night sector during quiet solar wind conditions : SuperDARN and satellite observations, *Ann. Geophys.*, 20, 771-779

Smets, R., D. Delcourt, G. Chanteur, T.E. Moore, On the incidence of Kelvin-Helmholtz instability for mass exchange process at the Earth's magnetopause, *Annales Geophysicae*, Vol. 20, pp 757-769, 2002

Sorriso-Valvo, L., Carbone, V., Noullez, A., Politano, H., Pouquet, A., and P.L. Veltri, (2002), Analysis of cancellation in two-dimensional MHD turbulence, *Phys. Plasmas*, 9, 89

Stenuit H., Fujimoto M., Fuselier S. A., Sauvaud J. A., Wing S., Fedorov A., Budnik E., Savin S. P., Trattner K. J., Angelopoulos V., Bonnell J., Phan T. D., Mukai T., Pedersen A., "Multispacecraft study on the dynamics of the dusk-flank magnetosphere under northward IMF: 10-11 January 1997", *J. Geophys. Res. (Space Physics)*, Volume 107, Issue A10, pp. SMP 27-1, 2002.

Stepanova M. V., Antonova E. E., Bosqued J. M., Kovrazhkin R. A., Aubel K. R., "Asymmetry of auroral electron precipitations and its relationship to the substorm expansion phase onset", *J. Geophys. Res. (Space Physics)*, Volume 107, Issue A7, pp. SMP 25-1, 2002.

Tang, Y. H.; Li, Y. N.; Fang, C.; Schmieder, B.; Aulanier, G.; Demoulin, P. (2002), Energetics of the 18 May 1994 brightening event, *Advances in Space Research*, 30, 557

Titov, V.S., Hornig, G., Démoulin P. (2002), The theory of magnetic connectivity in the solar corona, *JGR*, 107, 8, 3-1

Treilhou J. P., Jacquy C., Coutelier J., Thocaven J. J., Lorenzen K., McCarthy M., Parks G. K., Lazutin L., "INTERBOA: a balloon project for auroral studies and magnetosphere/ionosphere research", *Adv. Space Res.*, Volume 30, Issue 5, p. 1371-1380, 2002.

Trottet G., J.P Raulin., P. Kaufmann, M. Siarkowsky, K.-L. Klein, D.E. Gary (2002), First detection of the impulsive and extended phases of a solar radio burst above 200 GHz, *Astron. Astrophys.*, 381, 694

Tziotziou, K., G. Tsiropoula, P. Mein (2002), Ca II 8542 sunspot oscillations observed with THEMIS, *A&A*, 381, 279

Van Driel-Gesztelyi, L., Schmieder, B., & Baranyi, T. (2002), Evolution of the source region of the interplanetary magnetic cloud of 18-20 Oct. 1995, *Advances in Space Research*, 29, 1489

Ventura R., D. Spadaro, M. Uzzo and R. Suleiman, 2002, "UV line intensity and flow velocity distributions in tow coronal mass ejections as deduced by UVCS-SOHO observations", *A&A*, 383, 1032-1048

Vignes, D., M.H. Acuña, J.E.P. Connerney, D.H. Crider, C. Mazelle, and H. Reme (2002), Factors controlling the location of the Bow Shock at Mars, *Geophys. Res.Lett.*, 29, 9, 42-1

Villain, J.-P., R. André, M. Pinnock, R. A. Greenwald, and C. Hanuise (2002), A statistical study of the Doppler spectral width of high-latitude F-region echoes recorded with SuperDARN coherent HF radars, *Ann. Geophysicae.*, 20, 1769-1781

Vilmer, N., S. Krucker, R.P. Lin, RHESSI Team (2002), Hard X-ray and Metric/Decimetric Radio Observations of the 20 February 2002 Solar Flare, *Solar Phys.*, 210, 261

Vontrat-Reberac, A., J.-C. Cerisier, N. Sato et M. Lester (2002), Noon ionospheric signatures of a sudden commencement following a solar wind pressure pulse, *Ann. Geophysicae*, 20, 639

Zelenyi L.M., Delcourt D., Malova H.V., Sharma A.S. (2002) "Aging" of the magnetotail thin current sheets. *Geophysical Research Letters*. ISSN : 0094-8276. , vol. 29, doi: 10.1029/2001GL013789.

Zelenyi L.M., Delcourt D., Malova H.V., Sharma A.S., Popov V.YU., Bykov A.A. (2002) Forced current sheets in the Earth's magnetotail: Their role and evolution due to nonadiabatic particle scattering. *Advances in Space Research*. ISSN : 0273-1177. , vol. 30, n. 7, 10 p. , pp. 1629-1638.

Zelenyi L., Sauvaud J.-A., "The Interball project after 6 years of data analysis", *Ann. Geophys.*, vol. 20, Issue 3, pp.289-291, 2002.

3. Publications 2003

Amari, T, Luciani, J.F., Aly, J.J., Mikic, Z. and Linker, J., (2003), Coronal Mass Ejection: Initiation, Magnetic Helicity and flux Ropes: I Boundary motions driven evolution, *Astrophys. Journal*. 585, 1073-1086

Amari, T, Luciani, J.F., Aly, J.J., Mikic, Z. and Linker, J., (2003), Coronal Mass Ejection: Initiation, Magnetic Helicity and flux Ropes: II Turbulent Diffusion driven evolution, *Astrophys. Journal*. 95, 1231-1250.

André, R. and T. Dudok de Wit (2003) Identification of the ionospheric footprint of magnetospheric boundaries using SuperDARN coherent HF radars, *Planetary and Space Science* 51, 813-820

André, R., C. Hanuise, J.-P. Villain, and V. Krasnoselskikh (2003) Turbulence characteristics inside small-scale expanding structures observed with SuperDARN HF radars, *Ann. Geophysicae*, 21, 1839-1845

Aulanier, G., Démoulin, P. (2003), Amplitude and orientation of prominence magnetic fields from constant-alpha magnetohydrostatic models, *A&A*, 402, 769

Aurass H.; Klein K.-L.; Zlotnik E. Y.; Zaitsev V. V. (2003), Solar type IV burst spectral fine structures. I. Observations, *A&A*, 410, 1001

Berthomier M., Pottellette R., Muschetti L., Roth I., Carlson C. (2003) Scaling of 3D solitary waves observed by FAST and POLAR. *Geophysical Research Letters*. ISSN : 0094-8276, vol. 30, n. 22, 5 p., pp. 2148-2152, doi:10.1029/2002JA009303.

Bhattacharjee Ng, Germaschewski and Galtier (2003) Anisotropic fluid turbulence in the interstellar medium and solar wind, *Physics Plasmas* 10(5), 1954-1962

Blečki J., Saving S., Cornilleau-Wehrin N., Kossacki K., Parrot M., Rothkaehl H., Stasiewicz K., Wronowski R., Santolik O., Sauvaud J. A., "Fine structure of the polar cusp as deduced from the plasma wave and plasma measurements", *Adv. Space Res.*, Volume 32, Issue 3, p. 315-321, 2003.

Bouhram M., Malingre M., Jasperse J.R., Dubouloz N., Sauvaud J.A. (2003) Modeling transverse heating and outflow of ionospheric ions from the dayside cusp/cleft. 2. Applications. *Annales Geophysicae*. ISSN : 0148-0227, vol. 21, n. 8, 19 p., pp. 1773-1791.

Bouhram M., Malingre M., Jasperse J.R., Dubouloz N. (2003) Modeling transverse heating and outflow of ionospheric ions from the dayside cusp/cleft. 1. A parametric study. *Annales Geophysicae*. ISSN : 0148-0227, vol. 21, n. 8, 19 p., pp. 1753-1771.

Brown, A., López Ariste, A., & Casini, R. (2003), The effect of atomic polarization on early estimates of prominence magnetic field strengths, *Solar Physics*,

Buchlin, Aletti, Galtier, Velli, Einaudi and Vial (2003), A Solar Cellular Automata Model Based on Reduced MHD, *A&A* 406, 1061-1070

Burinskaya T. M., Rusanov A. A., Rauch J. L., Miles A., Mogilevsky M. M., Trotignon J. G., Lefeuvre F., Sauvaud J. A., "Small-scale bursts of Langmuir waves in the polar cap", *Adv. Space Res.*, Volume 31, Issue 5, p. 1247-1252, 2003.

Buzulukova N.Yu., Kovrazhkin R.A., Glazunov A. L., Sauvaud J. A., Ganushkina N.Yu., Pulkkinen T.I., "Stationary Nose Structures of Protons in the Inner Magnetosphere: Observations by the ION Instrument onboard the Interball-2 Satellite and Modeling", *Cosmic Research*, v. 41, Issue 1,

p. 3-12, 2003.

Casini, R., López Ariste, A., Tomczyk, S., & Lites, B. W. (2003), Magnetic Maps of Prominences from Full Stokes Analysis of the He I D3 Line, *Astrophysical Journal*, 598, L67

Cornilleau-Wehrin, N., G. Chanteur, S. Perraut, L. Rezeau, P. Robert, A. Roux, C. de Villedary, P. Canu, M. Maksimovic, Y. de Conchy, D. Hubert, C. Lacombe, F. Lefeuvre, M. Parrot, J.L. Pinçon, P.M.E. Décréau, C.C. Harvey, Ph. Louarn, O. Santolik, H. St. C. Alleyne, M. Roth, T. Chust, O. Lecontel, First results obtained by the Cluster STAFF experiment, *Annales Geophysicae*, Vol. 21, pp 437-456, 2003

Dasso, S., Mandrini, C.H., Démoulin, P., Farrugia, C.J. (2003), Magnetic helicity analysis of an interplanetary twisted flux tube, *JGR*, 108, A10, 1362

Del Zanna G. and Mason H.E., (2003), "Solar active regions: SOHO/CDS and TRACE observations of quiescent coronal loops", *A&A*, 406, 1089-1103,

Démoulin, P., Berger, M.A. (2003), Magnetic energy and helicity fluxes at the photospheric level, *Solar Physics*, 215, 203

Démoulin, P., van Driel-Gesztelyi, L., Mandrini, C.H., Klimchuk, J., Harra, L. (2003), The Long-Term evolution of AR 7978: Testing Coronal Heating Models, *ApJ*, 586, 592

Derouich, M., S. Sahal-Bréchet, and P. S. Barklem (2003), Collisional depolarization and transfer rates of spectral lines by atomic hydrogen. II: application to d states of neutral atoms, *Astron. Astrophys.*, 409, 369-373

Derouich, M., S. Sahal-Bréchet, and P. S. Barklem (2003), On the collisional depolarization and transfer rates of spectral lines by atomic hydrogen. III: application to f -states of neutral atom., *Astron. Astrophys.*, 414, 373-377

Derouich, M., S. Sahal-Bréchet, P. S. Barklem, and B. J. O'Mara (2003), Semi classical theory of collisional depolarization of spectral lines by atomic hydrogen. I: application to p states of neutral atoms, *Astron. Astrophys.*, 404, 763-773

Dubin E., K. Sauer, J. F. McKenzie, G. Chanteur, Solitons, oscillitons, and stationary waves in a cold $p - \alpha$ plasma, *J. Geophys. Res.*, 108 (A7), 1295, doi:10.1029/2002JA009571, 2003.

Dubin E., K. Sauer, J. F. McKenzie, G. Chanteur, Solitons, oscillitons, and stationary waves in a warm $p - \alpha$ plasma, *J. Geophys. Res.*, 108 (A7), 1296, doi:10.1029/2002JA009572, 2003.

Eastwood, J.P., A. Balogh, E. Lucek, C. Mazelle, and I. Dandouras (2003), On the existence of Alfvén waves in the terrestrial foreshock, *Annales Geophysicae*, 21, 1457-1465

Faurobert M., Arnaud J. (2003) Center-to-limb variation of scattering polarization in molecular solar lines: Observations and modeling, *Astronomy and Astrophysics* 412, 555

Fedorov A., E.Budnik, H.Stenuit, T. Moreau, and J. A.Sauvaud, Antiparallel reconnection as a possible source of high- and low-latitude boundary layers, *Geophysical Monograph Vol.133*, AGU, 2003.

Fluri, D.M., K. N. Nagendra, and H. Frisch (2003), An operator perturbation method for polarized line transfer. VI. Generalized PALI method for Hanle effect with partial frequency redistribution and collisions, *Astron. Astrophys.*, 400, 303-317

Gabriel A H, Bely-Dubau, F Lemaire P (2003) The contribution of polar plumes to the fast solar wind, *Astrophys J*, 589, 623

- Galtier, S. and Bhattacharjee (2003) Anisotropic weak whistler wave turbulence in electron MHD , *Physics Plasmas* 10(8), 3065-3076
- Galtier, S. (2003), A weak inertial wave turbulence theory , *Phys. Rev. E* 68, 15301
- Green L.M., Démoulin P., Mandrini C.H., van Driel-Gesztelyi L. (2003) How are emerging flux, flares and CMEs related to magnetic polarity imbalance in MDI data? , *Solar Physics*, 215, 307
- Grigorenko E. E., Fedorov A. O., Zelenyi L. M., Sauvaud J. A., "Coupling of transient plasma structures observed in the plasma sheet boundary layer and in the auroral region", *Adv. Space Res.*, Volume 31, Issue 5, p. 1271-1276, 2003.
- Guermond J.L., J. Léorat et C. Nore (2003), A new finite element method for magneto-dynamical problems : two-dimensional results, *Eur. J. of Mechanics, B/Fluids*, 22, 555-579
- Habbal, S. R., Arndt, M. B., Nayfeh, M. H., Arnaud, J. et al. (2003) On the Detection of the Signature of Silicon Nanoparticle Dust Grains in Coronal Holes, *ApJ*, 592,87
- Hada T., Ohnishi, B. Lembege and P. Savoini (2003), Shock front nonstationarity of supercritical perpendicular shocks, *J. Geophys. Res.*, 108, A6, 1233
- Hanasz J., Pachenko M., DE Feraudy H., Schreiber R., Mogilevski M. M. (2003) Occurrence of the AKR ordinary and extraordinary wave modes. *Journal of Geophysical Research.* , vol. 108, DOI 10.1029/2002JA009579.
- Harra, L.K., Matthews, S.A., and van Driel-Gesztelyi, L. (2003), Evidence of Flaring in a Transequatorial Loop on the Sun, *ApJ*, 598, L59
- Harrison R.A., Harra L.K., Brkovic A., Parnell C.E., (2003), "A study of the unification of quiet-Sun transient-event phenomena ", *A&A*, 409, 755
- Harvey, C.C., Huc C., Nonon-Latapie, M. (2003) CDDP, Centre de Données de la Physique des Plasmas, *Adv. Space Res.*, 31, 1291-1295
- Heinzel P., Anzer U., Schmieder B.(2003), A spectroscopic model of EUV filaments, *Solar Phys.*, 216, 159
- Hellinger P., P. Travnicek, A. Mangeney, and R. Grappin (2003) Hybrid simulations of the expanding solar wind: Temperatures and drift velocities, *Geophys. Res. Lett.* 30, 1211
- Hénoux J.-C., Karlický M. (2003), First detection of return currents in solar flares by spectropolarimetry with THEMIS, *A&A*, 407, 1103
- Hurford, G.J., R.A. Schwartz, S. Krucker, R.P. Lin, D.M. Smith, N. Vilmer (2003), First gamma-ray images of a solar flare, *ApJ Letters*, 595, L69
- Kerkeni, B., A. Spielfiedel, and N. Feautrier (2003), Depolarisation rates of Ca II s, p and d levels by isotropic collisions with hydrogen atoms, *Astron. Astrophys.*, 402, 5-11
- Klassen, A., S. Pohjolainen, K.-L. Klein (2003), Type II radio precursor and X-ray flare emission, *Solar Phys.* 218, 197
- Klein K.-L., R.A. Schwartz, J.M. McTiernan, G. Trottet, A. Lecacheux, (2003) An upper limit of the number and energy of electrons accelerated at an extended coronal shock wave, *Astron. Astrophys.* 409, 317

- Lamy, H., V. Pierrard, M. Maksimovic, J. Lemaire (2003), A kinetic exospheric model of the solar wind with a nonmonotonic potential energy for the protons, *J. of Geophys. Res.*, 108, 13-1
- Landi S. and F. Pantellini (2003) Kinetic simulations of the solar wind from the subsonic to the supersonic regime, *A&A*, 400, 769
- Laveder, D., Passot, T., Sulem, C., Sulem, P.L., Wang, D., and X.P. Wang (2003) Wave collapse in dispersive magnetohydrodynamics: direct simulations and envelope modeling, *Physica D*, 184, 237.
- Lembege B., M. Balikhin, P. Savoini, V. Krasnoselkikh and Walker (2003), Demagnetisation of transmitted electron through a quasi-perpendicular collisionless shock, *J. Geophys.Res.*, 108, A6, 1256
- Lilensten J. and L.R. Cander, (2003) Calibration of the TEC derived from GPS measurements and from ionospheric models using the EISCAT radar, *J. Atm. Sol. Ter. Phys.*, 65, 833-842
- Lin, R.P., S. Krucker, G.J. Hurford, D.M. Smith, H.S. Hudson, G.D. Holman, R.A. Schwartz, B.R. Dennis, G.H. Share, R.J. Murphy, A.G. Emslie, C. Johns-Krull, N. Vilmer, (2003) RHESSI observations of particle acceleration and energy release in an intense solar gamma-ray line flare, *ApJ Letters*, 595, L69
- Linker-JA, Mikic-Z, Lionello-R, Riley-P, Amari-T, Odstreil-D, (2003), Flux cancellation and coronal mass ejections, *Physics of Plasmas*, 10 (5) , 1971-1978
- Louarn, P., E. Budnik, J. A. Sauvaud, G. Parks, K. Meziane, J. M. Bosqued, J. Dandouras, H. Rème, U. Mall, P. Daly, M. Dunlop, A. Balogh, L.M. Kistler, and E. Amata, "Observation of energy-time dispersed ion structures in the magnetosheath by CLUSTER: possible signatures of transient acceleration processes at shock", *Ann. Geophys.*, 21 (7), 1483-1495, 2003.
- López Ariste, A. & Casini, R. (2003), Improved Estimate of the Magnetic Field in a Prominence, *ApJ* , 582, L51
- Lundin R., Sauvaud J. A., Rème H., Balogh A., Dandouras J., Bosqued J. M., Carlson C., Parks G. K., Möbius E., Kistler L. M., Klecker B., Amata E., Formisano V., Dunlop M., Eliasson L., Korth A., Lavraud B., McCarthy M., "Evidence for impulsive solar wind plasma penetration through the dayside magnetopause", *Ann. Geophys.*, Volume 21, Issue 2, pp.457-472, 2003.
- Lyssenko M.A., A.V. Tur, V.V. Yanovsky, "Statistical description of the random fields local maximum", *J. of Func. Mat.*, v. 10, N4, p. 577, 2003.
- López Fuentes, M.C., Démoulin, P., Mandrini, C.H., Pevtsov, A.A., van Driel-Gesztelyi, L. (2003), Magnetic Twist and Writhe of Actives Regions , *A&A*, 397, 305
- Madjarska M.S., Doyle J.G., (2003), "Simultaneous observations of solar transition region blinkers and explosive events by SUMER, CDS and BBSO. Are blinkers, explosive events and spicules the same phenomenon?", *Astronomy and Astrophysics*, 403, p.731-741
- Maia D., Aulanier G., Wang S.J., Pick M., Malherbe J.-M., Delaboudiniere J.-P. (2003), Interpretation of a complex CME event: Coupling of scales in multiple flux systems, *A&A*, 405, 313
- Marchaudon, A., J.-C. Cerisier, J.-M. Bosqued, M. W. Dunlop, J. A. Wild, P. M. E. Decreau, M. Forster, D. Fontaine, H. Laakso (2003), Transient plasma injections in the dayside magnetosphere: one to one correlated observations by Cluster and SuperDARN, *Ann. Geophysicae*, 2003.
- Marié L., J. Burguete, F. Daviaud and J. Léorat (2003) Numerical study of homogeneous dynamos based on experimental von Karman type flows ", *European Physical Journal B*, 33,469-485
- Matthews, M.A., van Driel-Gesztelyi, L., Hudson, H.S., and Nitta, N.V. (2003) A catalogue of white-light flares observed by Yohkoh, *A&A*, 409, 1107

Mazelle, C., K. Meziane, D. Le Quéau, M. Wilber, J.P. Eastwood, H., Rème, J.A. Sauvaud, J.M. Bosqued, I. Dandouras, M. Mccarthy, L.M., Kistler, B. Klecker, A. Korth, G. Pallochia, M.B. Bavassanocattaneo, R. Lundin, and A. Balogh (2003) Production of gyrating ions from nonlinear wave-particle interaction upstream from the Earth's Bow Shock: A Case Study from Cluster-Cis,, *Planet. Sp. Science*, 51, 785-795

Meunier N., Kosovichev A. (2003) Fast photospheric flows and magnetic fields in a flaring active region, *A&A*, 412, 541

Meunier N., (2003), Statistical properties of magnetic structures: their dependence on scale and solar activity, *Astronom. Astrophys.* 405, 1107

Milan, S.E., M. Lester, S.W.H. Cowley, K. Oksavik, M. Brittnacher, R. A. Greenwald, G. Sofko, and J.-P. Villain (2003) Variations in polar cap area during two substorm cycles, *Ann. Geophys.*, 21, 1121-1140

Mottez F. (2003) Exact nonlinear analytic Vlasov-Maxwell tangential equilibria with arbitrary density and temperature profiles. *Physics of Plasmas*. ISSN : 1070-664X. , vol. 10, n. 6, 8 p. , pp. 2501-2508.
Müller D., Hansteen V., Peter H.,(2003), "Dynamics of solar coronal loops. I- Condensation in cool loops and its effect on transition region lines", *A&A*, 411, 605

Mueller W.-C., D. Biskamp, R. Grappin (2003) Statistical anisotropy of hydromagnetic turbulence, *Physical Review E*, vol. 67

Narita Y., Glassmeier K.-H., Schäfer S., Motschmann U., Sauer K., Dandouras J., Fornaçon K.-H., Georgescu E., Rème H., "Dispersion analysis of ULF waves in the foreshock using cluster data and the wave telescope technique", *Geophys. Res. Lett.*, Volume 30, Issue 13, pp. SSC 43-1, 2003.

Naydenov S.V., A.V. Tur, A.V. Yanovsky ,V.V. Yanovsky, "New Scenario to Chaos Transition in the Mappings with Discontinuities", *Phys.Lett. A*, v. 230, p160, 2003.

Naydenov S.V., A.V. Tur, V.V. Yanovsky, " The stability of dynamical systems with discontinuities", *J.of Func. Mat.*, v.10, N1, p.14, 2003.

Nemecek Z., Safránková, J., Prech L., Simunek J., Sauvaud J. A., Fedorov A., Stenuit H., Fuselier S. A., Savin S., Zelenyi L., Berchem J., "Structure of the outer cusp and sources of the cusp precipitation during intervals of a horizontal IMF", *J. Geophys. Res.*, Volume 108, Issue A12, pp. SMP 6-1, 2003.

Nykyri K., Cargill P. J., Lucek E. A., Horbury T. S., Balogh A., Lavraud B., Dandouras J., Rème H., "Ion cyclotron waves in the high altitude cusp: CLUSTER observations at varying spacecraft separations", *Geophys. Res. Lett.*, Volume 30, Issue 24, pp. SSC 12-1, 2003.

Parenti S., Landi E., Bromage B.J.I., (2003), "SOHO-Ulysses Spring 2000 Quadrature: Coronal Diagnostic Spectrometer and SUMER Results", *ApJ*, 590, 519-532

Parrot M., Santolik O., Cornilleau-Wehrin N., Maksimovic M., Harvey C. (2003) Source location of chorus emissions observed by CLUSTER. *Annales Geophysicae*. ISSN : 0992-7689. , vol. 21, n. 2, pp. 473-480.

Parrot M., Santolik O., Cornilleau-Wehrin N., Maksimovic M., Harvey C. (2003) Magnetospherically reflected chorus waves revealed by ray tracing with CLUSTER data. *Annales Geophysicae*. ISSN : 0992-7689. , vol. 21, n. 5, pp. 1111-1120.

Passot , T., and P.L. Sulem, (2003) Long-Alfvén-wave trains in collisionless plasmas. II. A Landau-fluid approach, *Phys. Plasmas*, 10, 3906

- Passot, T., and P.L. Sulem (2003) Filamentation instability of long Alfvén waves in warm collisionless plasmas, *Phys. Plasmas*, 10, 3914
- Passot, T., and P.L. Sulem (2003) Long-Alfvén-wave trains in collisionless plasmas. I. Kinetic theory, *Phys. Plasmas*, 10, 3887
- Perraut S., Le Contel O., Roux A., Parks G., Chua D., Hoshino M., Makai T., Nagai T. (2003) Substorm expansion phase: Observations from Geotail, Polar and IMAGE network. *Journal of Geophysical Research*. ISSN : 0148-0227. , vol. 108, n. A4, 16 p. , 10.1029/2002JA009376.
- Pick M., D. Maia and Ch. Marqué (2003) Solar radio emission at solar maximum: CME development in the corona, *Advances in Space Research*, Vol 32, 4, 467-472
- Pick M., D. Maia, S.J. Wang, A. Lecacheux, D. Haggery, S. E. Hawkins (2003) Solar origin of energetic particle events: Near-relativistic impulsive electron events observed at 1 AU, *Advances in Space Research*, Vol 32, 2527-2532
- Pinnock, M., G. Chisham, I.J. Coleman, M.P. Freeman, M. Hairston, and J.-P. Villain (2003) The location and rate of dayside reconnection during an interval of southward interplanetary magnetic field, *Ann. Geophysicae*, 21,1467-1482
- Petrukovich A. A., Baumjohann W., Nakamura R., Balogh A., Mukai T., Glassmeier K.-H., Rème H., Klecker B., "Plasma sheet structure during strongly northward IMF", *J. Geophys. Res. Space Physics*, Volume 108, Issue A6, pp. SMP 22-1, 2003.
- Phan T., Frey H. U., Frey S., Peticolas L., Fuselier S., Carlson C., Rème H., Bosqued J. M., Balogh A., Dunlop M., Kistler L., Mouikis C., Dandouras J., Sauvaud J. A., Mende S., McFadden J., Parks G., Moebius E., Klecker B., Paschmann G., Fujimoto M., Petrinec S., Marcucci M. F., Korth A., Lundin R., "Simultaneous Cluster and IMAGE observations of cusp reconnection and auroral proton spot for northward IMF", *Geophys. Res. Lett.*, Volume 30, Issue 10, pp. 16-1, 2003.
- Pitout F., and P.-L. Blelly, (2003), Electron Density in the Cusp Ionosphere: Increase or Depletion?, *Geophys. Res. Lett.*, 30, 14, 1726
- Pitout, F., P. Eglitis and P.-L. Blelly, (2003), High-latitude dayside ionosphere response to Pc5 field line resonance, *Annales Geophys.*, 21, 1509-1520
- Politano, H., Gomez, T., and A. Pouquet (2003) von Karman-Howarth relationship for helical magnetohydrodynamic flows, *Phys. Rev. E*, 68, 026315
- Ponty, Y., Gilbert, A.D., and A.M. Soward (2003) The onset of thermal convection in Ekman-Couette shear flow with oblique rotation, *J. of Fluid Mech.*, 487, 91
- Popielawska B., Sandahl I., Joko Sachiko, Stenuit H., Romanov S. A., Zakharov A. V., "Oxygen ion beams at the boundary of velocity dispersed ion structures in the high-latitude magnetosphere under northward interplanetary magnetic field with a large by-component: Interball-tail observations", *Adv. Space Res.*, Volume 31, Issue 5, p. 1363-1370, 2003.
- Pottelette R., Treumann R., Berthomier M., Jasperse J. (2003) Electrostatic Shock Properties Inferred from AKR Fine Structure. *Nonlinear Processes in Geophysics*. ISSN : 1023-5809. , vol. 10, n. 1, 6 p. , pp. 87-92.
- Richmond A.D., C. Lathuillère and S. Vennerstroem, (2003), Winds in the high-latitude lower thermosphere: Dependence on the interplanetary magnetic field *J. Geophys. Res.*, 108(2), 1066
- Richmond, A. D., C. Peymirat, and R. G. Roble, Long-lasting disturbances in the equatorial ionospheric electric field simulated with a coupled magnetosphere-ionosphere-thermosphere model, 108(3), 1118

- Roudier T., Ligni eres F., Rieutord , M., Brandt P.N., Malherbe J.M. (2003), Families of fragmenting granules and their relation to meso- and supergranular flow fields, *A&A*, 409, 299
- Roudier Th., Malherbe J.M., Mein P., Muller R., Coutard C., Lafon M., Grimaud F. (2003) : High spatial resolution capabilities of Doppler measurements with the Pic du Midi MSDP spectrograph, *A&A* 409.
- Rozelot J.P., Lefebvre S., Desnoux V., (2003), Observations of the solar limb shape distortions, *Solar Phys.* 217, 39.
- Runov A., Nakamura R., Baumjohann W., Treumann R. A., Zhang T. L., Volwerk M., V or os Z., Balogh A., Gla bmeier K.-H., Klecker B., R eme H., Kistler L., "Current sheet structure near magnetic X-line observed by Cluster", *Geophys. Res. Lett.*, Volume 30, Issue 11, pp. 33-1, 2003.
- Sahraoui, S., G. Belmont, and L. Rezeau (2003) From Bi-Fluid to Hall-MHD Weak Turbulence: Hamiltonian Canonical Formulations, *Physics of Plasmas*, 10, 1325-1337.
- Sahraoui, S., Pin on J.L., G Belmont., L. Rezeau, N. Cornilleau-Wehrin, P. Robert, Mellul L., J. M. Bosqued, P. Canu, A. Balogh, G. Chanteur (2003), ULF wave identification in the magnetosheath: k-filtering technique applied to Cluster II data, *J. Geophys. Res.*, 108 (9), 1335.
- Salem C., D. Hubert, C. Lacombe, A. Mangeney, P.J. Kellog and J.M. Bosqued (2003) Electron properties and coulomb collisions in the solar wind at 1 AU: WIND observations, *ApJ*, 585, 1147
- Salem C., S. Hoang, K. Issautier, M. Maksimovic, C. Perche (2003) Wind-Ulysses in situ thermal noise measurements of the solar wind electron density and thermal temperature at solar maximum and minimum, *Adv. Space Res.*, 32, 491-496
- Sanchez Almeida J., Dominguez Cerdena I., Kneer F. (2003), Simultaneous Visible and Infrared Spectropolarimetry of a Solar Internetwork Region, *Ap J*, 597, L177
- Santol ık, O., Gurnett D.A., Pickett J.S., Parrot M., Cornilleau-Wehrin N. (2003) Spatio-temporal structure of storm-time chorus. *Journal of Geophysical Research*. ISSN : 0148-0227. , vol. 108, n. A7, 10.1029/2002JA009791.
- Schmieder B., Tziotziou K., Heinzl P. (2003) , Spectroscopic diagnostics of an Halpha and EUV filament observed with THEMIS and SOHO, *A&A*, 401, 361
- Seran E. (2003) Reconstruction of the ion plasma parameters from the current measurements: Mathematical tool. *Annales Geophysicae*. ISSN : 0992-7689. , vol. 21, n. 5, 8 p. , pp. 1159-1166, SRef-ID: 1432-0576/ag/2003-21-1159.
- Sergeev V. A., Sauvaud J. A., R eme H., Balogh A., Daly P., Zong Q.-G., Angelopoulos V., Andr e M., Vaivads A., "Sharp boundary between the inner magnetosphere and active outer plasma sheet", *Geophys. Res. Lett.*, Volume 30, Issue 15, pp. SSC 3-1, 2003.
- Sergeev V., Runov A., Baumjohann W., Nakamura R., Zhang T. L., Volwerk M., Balogh A., R eme H., Sauvaud J. A., And R eme M., Klecker B., "Current sheet flapping motion and structure observed by Cluster", *Geophys. Res. Lett.*, Volume 30, Issue 6, pp. 60-1, 2003.
- Slavin J. A., Lepping R. P., Gjerloev J., Goldstein M. L., Fairfield D. H., Acuna M. H., Balogh A., Dunlop M., Kivelson M. G., Khurana K., Fazakerley A., Owen C. J., R eme H., Bosqued J. M., " Cluster electric current density measurements within a magnetic flux rope in the plasma sheet", *Geophys. Res. Lett.*, Volume 30, Issue 7, pp. 14-1, 2003.
- Slavin J. A., Owen C. J., Dunlop M. W., Bor alv E., Moldwin M. B., Sibeck D. G., Tanskanen E., Goldstein M. L., Fazakerley A., Balogh A., Lucek E., Richter I., R eme H., Bosqued J. M., "Cluster

four spacecraft measurements of small traveling compression regions in the near-tail", *Geophys. Res. Lett.*, Volume 30, Issue 23, pp. SSC 7-1, 2003.

Stasiewicz K., Shukla P. K., Gustafsson G., Buchert S., Lavraud B., Thidé, B., Klos Z., "Slow Magnetosonic Solitons Detected by the Cluster Spacecraft", *Physical Review Letters*, Volume 90, Issue 8, 2003

Teriaca L., Falchi A., Cauzzi, G., Falciani R., Smaldone L. A., Andretta V., (2003), "Solar and Heliospheric Observatory/Coronal Diagnostic Spectrograph and Ground-based Observations of a Two-Ribbon Flare: Spatially Resolved Signatures of Chromospheric Evaporation", *The Astrophysical Journal*, Volume 588, Issue 1, pp. 596-605

Trottet G., R.A. Schwartz, K. Hurley, J.M.McTiernan, S.R. Kane, N. Vilmer (2003) Stereoscopic Observations of the giant hard X-ray/ γ -ray solar flare on 1991 June 30 at 0255 UT, *Astron. Astrophys*, 403, 1157

Trattner K. J., Fuselier S. A., Yeoman T. K., Korth A., Fraenz M., Mouikis C., Kucharek H., Kistler L. M., Escoubet C. P., Rème H., Dandouras J., Sauvaud J. A., Bosqued J. M., Klecker B., Carlson C., Phan T., McFadden J. P., Amata E., Eliasson L., "Cusp structures: combining multi-spacecraft observations with ground-based observations", *Ann. Geophys.*, Volume 21, Issue 10, pp.2031-2041, 2003.

Trottet, G., (2003), Coronal signatures of accelerated particles, *Adv. Space Res.* 32(12)

Trotignon J.G., Decreau P.M.E., Rauch J.L., Le Guirriec E., Canu P., Darrouzet F. (2003) The WHISPER relaxation sounder onboard CLUSTER: a powerful tool for space plasma diagnosis around the Earth., *Cosmic Research*. ISSN : 0010-9525 . , vol. 41, n. 4, 4 p. , pp. 345-348.

Trotignon J.G., Rauch J.L., Decreau P.M.E., Canu P., Lemaire J. (2003) Active and passive plasma wave investigations in the Earth's environment: The Cluster/Whisper experiment. *Advances in Space Research*. ISSN : 0273-1177. , vol. 31, n. 5, 15 p. , pp. 1449-1454.

Tziotziou, K., Tsiropoula, G., & Mein, P. (2003), On the nature of the chromospheric fine structure. I. Dynamics of dark mottles and grains, *A&A*, 402, 361

Vallières, X., J.-P. Villain, and R. André (2003) Characterization of frequency effect in SuperDARN spectral width distribution, *Radio Sci.*, 38(1), 1003

Van Driel-Gesztelyi, L., Démoulin, P., Mandrini, C.H., Harra, L., Klimchuk, J.(2003), The long-term evolution of AR 7978: The Scalings of the Coronal Plasma Parameters with the Mean Photospheric Magnetic Field, *ApJ*, 586, 579

Van Driel-Gesztelyi, L., Démoulin, P., Mandrini, C.H., (2003), Observations of helicity, *Adv. Space Research*, 32/10, 1855

Vilmer, N., A.L. MacKinnon, G. Trottet, C. Barat, (2003) High energy particles accelerated during the large solar flare of 1990 May 24 : X/gamma ray observations, *Astron. Astrophys.* 412, 865

Vilmer, N., M. Pick, R. Schwenn, P. Ballatore and J.P. Villain (2003) On the solar origin of interplanetary disturbances observed in the vicinity of the Earth, *Annales Geophysicae*, 21, 847-862

Vilmer, N., S. Krucker, G. Trottet, R.P. Lin (2003) Hard X-ray and Metric/Decimetric Spatially Resolved Observations of the 10 April 2002 Solar Flare, *Advances in Space Research*, Vol 32, No12, 2509

Volwerk M., Glassmeier K.-H., Runov A., Baumjohann W., Nakamura R., Zhang T. L., Klecker B., Balogh A., Rème H., "Kink mode oscillation of the current sheet", *Geophys. Res. Lett.*, Volume 30, Issue 6, pp. 53-1, 2003.

Volwerk M., Nakamura R., Baumjohann W., Treumann R. A., Runov A., Vörös Z., Zhang T. L., Asano Y., Klecker B., Richter I., Balogh A., Rème H., "A statistical study of compressional waves in the tail current sheet", J. Geophys. Res., Volume 108, Issue A12, pp. SMP 12-1, 2003

Vonrat-Reberac, J. M. Bosqued, M. G. Taylor, B. Lavraud, D. Fontaine, M. W. Dunlop, H Laakso, N. Cornilleau-Wehrin, P. Canu, and A. Fazarkerley (2003), Cluster observations of the high-altitude cusp for northward interplanetary magnetic field: a case study, J. Geophys. Res., 108, 1346

Vörös Z., Baumjohann W., Nakamura R., Runov A., Zhang T. L., Volwerk M., Eichelberger H. U., Balogh A., Horbury T. S., Glaßmeier K.-H., Klecker B., Rème H., "Multi-scale magnetic field intermittence in the plasma sheet ", Ann. Geophys., Volume 21, Issue 9, pp.1955-1964, 2003.

Vrsnak B., K.-L. Klein, A. Warmuth, W. Otruba, M. Skender (2003) Characteristics of the energy release process in a simple dynamical flare, Solar Phys. 214, 325

Wahlund J.-E., Yilmaz A., Backrud M., Vaivads A., Winningham D., Andre, M., Balogh A., Bonnell J., Buchert S., Carozzi T., Cornilleau-Wehrin N., Dunlop M., Eriksson A.I., Gustafsson G., Parrot M., Robert P., Sundkvist D., Tjulin A. (2003) Observations of Auroral Broadband Emissions by CLUSTER. Geophysical Research Letters. ISSN : 0094-8276. , vol. 30, n. 11, 10.1029/2002GL016335.

Zelenyi L.M., Malova H.V., Popov V., Delcourt D., Sharma A. S. (2003) Evolution of ion distribution functions during the "aging" process of thin current sheets. Advances in Space Research. ISSN : 0273-1177. , vol. 31, n. 5, 8 p. , pp. 1207-1214.

Zharkova V.V., Ipson S.S, Zharkov S.I., Benkhalil A.K., Abouadarham J., Bentley R.D. (2003), Full disk image standardisation of the synoptic solar observations at the Meudon observatory Solar Physics 214, 89

Zong Q.-G., Fritz T. A., Spence H., Dunlop M., Pu Z. Y., Korth A., Daly P. W., Balogh A., Rème H., "Bursty energetic electrons confined in flux ropes in the cusp region", Planetary and Space Science, Volume 51, iss. 12, p. 821-830., 2003.

Zong W.G., Tang Y.H., Fang C., Mein P., Mein N. and Xu A.A. (2003) Spectro-polarimetric observation of the fine structure of a quiescent filament, A&A, 412, 267

SPW3 (actes de conférence internationale avec comité de lecture):

Third International Workshop on "Solar Polarization" organized by the Instituto de Astrofísica de Canarias, Puerto de la Cruz, Tenerife (Spain), 2002 September 30-October 4
2003, J. Trujillo Bueno and J. Sánchez Almeida (eds.), ASP Conf. Ser. 307

Bommier, V., The partial redistribution in the atomic density formalism, 213-226

Bommier, V., and B. Kerkeni, Theoretical Study of Collisional Depolarization and of the Hanle Effect in the Na I D2 Line Observed on the Solar Limb, 284-285

Casini, R. & López Ariste, A., PCA Inversion of Stokes Profiles in Solar Prominences, 109

Derouich, M., and S. Sahal-Bréchet, A New Semi-classical Calculation of Depolarization by Isotropic Collisions with Neutral Hydrogen, 270-277

Faurobert, M., and J. Arnaud, Second Solar Spectrum Observations at THEMIS, 431-433

Feautrier, N., A. Spielfiedel, and B. Kerkeni, Depolarization Rates of Resonance Lines of Mg, Ca, Sr and Na Atoms by Collisions with Hydrogen Atoms, 286-289

Habbal, S. R.; Woo, R.; Arndt, M.; Arnaud, J., (2003), On the Coexistence of a Radial and Non-radial Component of the Coronal Magnetic Field, Solar Polarization, 446

Nagendra, K.N., H. Frisch, and D. M. Fluri, Numerical Methods for Solving the Polarized Line Transfer Equations with Partial Frequency Redistribution, 227-240

4. Publications 2004

Aikio, A.T., K. Musrula, S. Buchert, F. Forme, O. Amm, G. Marklund, M. Dunlop, M. André, and D. Fontaine, (2004), Temporal evolution of two auroral arcs measured by the Cluster satellite and coordinated ground-based instruments, *Annalae Geophysicae*, 22, 4089.

Alexandrova et al, (2004), Cluster observations of finite amplitude Alfvén waves and small-scale magnetic filaments downstream of a quasi-perpendicular shock, *JGR*, 109(5), 5207.

Amari, T, Luciani, J.F, , Aly, J.J, (2004), Coronal Magnetohydrodynamics evolution Driven by Subphotospheric Conditions, *Astrophys. Journal. ApJ* 615, L165-168

Amory-Mazaudier C., Koba A., Vila P., AchyY-Seka A., Blanc E., Boka K., Bouvet J., CecileE J-F., Cohen Y., Curto J-J, Dukhan M., Doumouya V., Fambotakoye O., Farges T., Goutelard C., Guisso E., Hanbaba R., Houngninou E., Kone E., Lassudrie-Duchesne P., Lathuillere C., LerouxX Y., Menvielle M., Obrou E., Petitdidier M., Ogunade S.O., Onwumechili C. A., Rees D., Sambou E., Sow M., Vassal J. (2004) On equatorial geophysics studies : a review on the GIRGEA results during the last decade. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* ISSN : 1364-6826 (à paraître)

Anastasiadis A., C. Gontikakis, N. Vilmer, L. Vlahos, (2004), Electron acceleration and radiation in evolving complex active regions, *Astron. Astrophys.* 422, 323.

Antonucci E., Doderio M. A., Giordano S., Krishnakumar V., Noci, G., (2004), "Spectroscopic measurement of the plasma electron density and outflow velocity in a polar coronal hole", *Astronomy and Astrophysics*, 416, 749-758

Auchère F. et Artzner G.E., (2004), « EIT Observations of the November 15, 1999 Mercury Transit », *Solar Physics*, 219, 217-230

Berlicki A. and Heinzl P., (2004), Soft X-ray heating of the solar chromosphere during the gradual phase of two solar flares, *A&A*, 420, 319 .

Berlicki, A., B. Schmieder, N. Vilmer, G. Aulanier, G. Del Zanna, (2004), Evolution and magnetic topology of the M1.0 flare of October 22, 2002, *Astron. Astrophys.*, 423, 1119.

Berthomier, M., R. Pottelette, L. Muschietti, I. Roth, and C. Carlson, (2004), Scaling of 3D solitary waves observed by FAST and POLAR, *Geophysical Research Letters* 30 (22), 2148.

Bogdanova Y. V., Fazakerley A. N., Owen C. J., Klecker B., Cornilleau-Wehrin N., Grison B., André M., Cargill P., Rème H., Bosqued J. M., Kistler L. M., Balogh A., "Correlation between suprathermal electron bursts, broadband extremely low frequency waves, and local ion heating in the midaltitude cleft/low-latitude boundary layer observed by Cluster", *J. Geophys. Res.*, Volume 109, Issue A12, 2004.

Bogdanova Y. V., Klecker B., Paschmann G., Kistler L. M., Mouikis C., Moebius E., Rème H., Bosqued J. M., Dandouras J., Sauvaud J. A., Cornilleau-Wehrin N., Laakso H., Korth A., Bavassano-Cattaneo M. B., Marcucci M. F., Phan T., Carlson C., Parks G., McFadden J. P., McCarthy M., Lundin R., "Investigation of the source region of ionospheric oxygen outflow in the cleft/cusp using multi-spacecraft observations by CIS onboard Cluster", *Adv. Space Res.*, Volume 34, Issue 11, p. 2459-2464., 2004.

Bouhram M., Klecker B., Miyake W., Rème H., Sauvaud J. A., Malingre M., Kistler L., Blagau A., "On the altitude dependence of transversely heated O distributions in the cusp/cleft", *Ann. Geophys.*, Volume 22, Issue 5, pp.1787-1798, 2004.

- Bouhram, M. , Klecker, B., Paschmann, G., Rème, H., Blagau, A., Kistler, L., Puhl-Quinn, P., and Sauvaud, J. -A., (2004), Multipoint analysis of the spatio-temporal coherence of dayside O⁺ outflows with Cluster, *Annales Geophysicae*, 22 (7), 2507-2514.
- Brynildsen N., Maltby P., Kjeldseth-Moe O., Wilhelm K., (2004), "Dual flows with supersonic velocities in the sunspot transition region", *ApJ*, 612, 1193
- Cargill P., Dunlop M., Lavraud B., Elphic R., Holland D., Nykyri K., Balogh A., Dandouras J., Rème H., "CLUSTER encounters with the high altitude cusp: boundary structure and magnetic field depletions", *Ann. Geophys.*, Volume 22, Issue 5, pp.1739-1754, 2004.
- Cirigliano, D., Vial J.-C., Rovira M., (2004), « Prominence corona transition region plasma diagnostics from SOHO observations », *Solar Physics*, 223, 95-118
- Contesse, L. Koutchmy, S. and Viladrich, Ch., (2004), Analysis of non-thermal velocities in the solar corona, *Annales Geophysicae*, 22, 3055-3062.
- Culot F., C. Lathuillère, J. Lilensten and O. Witasse, (2004), The OI 630 and 557.7 nm dayglow measured by WINDII and modeled by TRANSCAR, *Ann. Geophys.*, 22, 1-14.
- Daglis I. A. , Delcourt D. , Metallinou F.-A. , Kamide Y. (2004) Particle acceleration in the frame of the storm-substorm relation. *IEEE Transactions on Plasma Science*,. ISSN : 0093-3813.
- Dandouras J., Pirard B., Prado J.Y., "High performance solar sails for linear trajectories and heliostationary missions", *Adv. Space Res.*, Volume 34, Issue 1, p. 198-203, 2004.
- Darrouzet, F. , Décréau, P. M. E., De Keyser, J., Masson, A., Gallagher, D. L., Santolik, O., Sandel, B. R., Trotignon, J. G., Rauch, J. L., Le Guirriec, E., Canu, P., Sedgemore, F., André, M., and Lemaire, J. F., (2004), Density structures inside the plasmasphere: Cluster observations, *Annales Geophysicae*, 22(7), 2577-2585.
- Décréau, P. M. E. , Ducoin, C., Le Rouzic, G., Randriamboarison, O., Rauch, J. -L., Trotignon, J. -G., Vallières, X., Canu, P., Darrouzet, F., Gough, M. P., Buckley, A. M., and Carozzi, T. D., (2004), Observation of continuum radiations from the Cluster fleet: first results from direction finding, *Annales Geophysicae*, 22(7), 2607-2624.
- De Groof, A., Berghmans, D., van Driel-Gesztelyi, L., Poedts, S., (2004), Intensity variations in EIT shutterless mode: waves or flows., *A&A*, 415, 1141.
- De Keyser, J. , Gustafsson, G., Roth, M., Darrouzet, F., Dunlop, M., Rème, H., Fazakerley, A., Décréau, P., and Cornilleau-Wehrlin, N. (2004), Reconstruction of the magnetopause and low-latitude boundary layer topology using Cluster multi-point measurements, *Annales Geophysicae*, Volume 22, Number 7., Page(s) 2381-2389.
- Delcourt D., Malova H.V., Zelenyi L.M. (2004) Dynamics of charged particles in bifurcated current sheet : the $k = 1$ regime. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*. ISSN : 0148-0227. , vol. 109, n. A1, A01222, doi:10.1029/2003JA010167.
- Derouich, M., S. Sahal-Bréchet, and P. S. Barklem (2004), Collisional depolarization and transfer rates of spectral lines by atomic hydrogen. IV: application to ionised atoms.", *A&A*, 426, 707-715
- Devoto, P., J.-L. Médale, C. Aoustin, J.-A. Sauvaud, "A low-power timing discriminator for space instrumentation", *Review of Scientific Instruments* Vol 75, No 12, pp 5100-5105, December 2004.
- Draper N., Lester M., Wild J., Milan S., Provan G., Grocott A., Cowley S., Bogdanova Y., Dewhurst J., Fazakerley A., Davies J., Bosqued J. M., "A joint Cluster and ground-based instruments study of two magnetospheric substorm events on 1 September 2002 ", *Ann. Geophys.*, Volume 22, Issue 12, pp.4217-4228, 2004

Eastwood, J.P., A. Balogh, C. Mazelle, I. Dandouras, And H. Rème, (2004), Oblique Propagation Of 30s Period Fast Magnetosonic Foreshock Waves: A Cluster Case, *Study Geophys. Res. Lett.*, 31(4), 4804.

Eriksson S., Elkington S. R., Phan T. D., Petriner S. M., Rème H., Dunlop M. W., Wiltberger M., Balogh A., Ergun R. E., André M., "Global control of merging by the interplanetary magnetic field: Cluster observations of dawnside flank magnetopause reconnection", *J. Geophys. Res.*, Volume 109, Issue A12, 2004.

Eriksson S., Øieroset M., Baker D. N., Mouikis C., Vaivads A., Dunlop M. W., Rème H., Ergun R. E., Balogh A., "Walén and slow-mode shock analyses in the near-Earth magnetotail in connection with a substorm onset on 27 August 2001", *J. Geophys. Res.*, Volume 109, Issue A10, 2004.

Farrugia, C. J., E. J. Lund, P. E. Sandholt, J. A. Wild, S. W. H. Cowley, A. Balogh, C. Mouikis, E. Mobius, M. W. Dunlop, J.-M. Bosqued, C. W. Carlson, G. K. Parks, J.-C. Cerisier, J. D. Kelly, J.-A. Sauvaud, and H. Reme, (2004), Pulsed flows at the high-altitude cusp poleward boundary, and associated ionospheric convection and particle signatures, during a Cluster - FAST - SuperDARN - Søndrestrøm conjunction under a southwest IMF, *Annales Geophysicae*, 22, 2891–2905.

Fruit G., P. Louarn, P., E. Budnik, J.A. Sauvaud, C. Jacquey, H. Rème, E. Lucek, A. Balogh, N. Cornilleau-Werhlin, (2004), Analysis of low-frequency fluctuations in the plamashet: Signal reconstruction and comparison with MHD theory, *J. Geophys. Res.*, 109(3),3217

Fruit G., Louarn P., Budnik E., Sauvaud J. A., Jacquey C., Le Quéau D., Rème H., Lucek E., Balogh A., Cornilleau-Wehrin N., "On the propagation of low-frequency fluctuations in the plasma sheet: 2. Characterization of the MHD eigenmodes and physical implications", *J. Geophys. Res.*, Volume 109, Issue A3, 2004.

Genot V., Louarn P., Mottez F. (2004) Alfvén wave interaction with inhomogeneous plasmas: acceleration and energy cascade towards small scales. *Annales Geophysicae. Series A, Upper atmosphere and space sciences.* ISSN : 0980-8752.

Génot V. and S. J. Schwartz, "Spacecraft potential effects on moments derived from a perfect plasma detector", *Ann. Geophys.*, 22(6), 2073, 2004.

Gibson, S.E., Fan, Y., Mandrini, C.H., Fisher, G., Démoulin, P., (2004), Observational consequences of a magnetic flux rope emerging into the corona., *ApJ*, 617, 600.

Goff, C.P., Matthews, S.A., van Driel-Gesztelyi, L., Harra, L.K. (2004), Relating magnetic field strength to hard X-ray emission in solar flares., *A&A*, 423, 363.

Grocott A., Yeoman T., Nakamura R., Cowley S., Frey H., Rème H., Klecker B., "Multi-instrument observations of the ionospheric counterpart of a bursty bulk flow in the near-Earth plasma sheet", *Ann. Geophys.*, Volume 22, Issue 4, pp.1061-1075, 2004.

Haaland S., Sonnerup B., Dunlop M., Balogh A., Georgescu E., Hasegawa H., Klecker B., Paschmann G., Puhl-Quinn P., Rème H., Vaith H., Vaivads A., "Four-spacecraft determination of magnetopause orientation, motion and thickness: comparison with results from single-spacecraft methods", *Ann. Geophys.*, Volume 22, Issue 4, pp.1347-1365, 2004.

Haerendel, G. , Georgescu, E., Glassmeier, K. H., Klecker, B., Bogdanova, Y. V., Rème, H., and Frey, H., (2004), Cluster observes formation of high-beta plasma blobs, *Annales Geophysicae*, 22 (7), 2391-2401.

Harvey C.C., Huc C., (2004), Future trends in data archiving and analysis tools, *Adv. Space Res.*, 33, 816-821.

- Hasegawa H., Fujimoto M., Phan T.-D., Rème H., Balogh A., Dunlop M. W., Hashimoto C., TanDokoro R., "Transport of solar wind into Earth's magnetosphere through rolled-up Kelvin-Helmholtz vortices", *Nature*, Volume 430, Issue 7001, pp. 755-758, 2004.
- Hasegawa H., Sonnerup B., Dunlop M., Balogh A., Haaland S., Klecker B., Paschmann G., Lavraud B., Dandouras J., Rème H., "Reconstruction of two-dimensional magnetopause structures from Cluster observations: verification of method", *Ann. Geophys.*, Volume 22, Issue 4, pp.1251-1266, 2004.
- Horbury T. S., Lucek E. A., Balogh A., Dandouras J., Rème H., "Motion and orientation of magnetic field dips and peaks in the terrestrial magnetosheath", *J. Geophys. Res.*, Volume 109, Issue A9, 2004
- Issautier, K. M. Moncuquet, S. Hoang, (2004), Solar wind electron parameters from Ulysses/Urap quasi-thermal noise measurements at solar maximum, *Solar Phys.*, 221, 351-359.
- Joko, S. , Nilsson, H., Lundin, R., Popielawska, B., Rème, H., Bavassano-Cattaneo, M. B., Paschmann, G., Korth, A., Kistler, L. M., and Parks, G. K., (2004), *Annales Geophysicae*, Volume 22 (7), 2473-2483.
- Keiling A., Rème H., Dandouras J., Bosqued J. M., Parks G. K., McCarthy M., Kistler L., Amata E., Klecker B., Korth A., Lundin R., "Transient ion beamlet injections into spatially separated PSBL flux tubes observed by Cluster-CIS", *Geophys. Res. Lett.*, Volume 31, Issue 12, 2004.
- Keiling A., Rème H., Dandouras J., Bosqued J. M., Sergeev V., Sauvaud J. A., Jacquy C., Lavraud B., Louarn P., Moreau T., Vallat C., Escoubet C. P., Parks G. K., McCarthy M., Möbius E., Amata E., Klecker B., Korth A., Lundin R., Daly P., Zong Q.-G., "New properties of energy-dispersed ions in the plasma sheet boundary layer observed by Cluster", *J. Geophys. Res.*, Volume 109, Issue A5, 2004
- Kerkeni, B., P. S. Barklem., A. Spielfiedel, and N. Feautrier (2004), Collisional broadening of Mg, Sr, Ca and Na resonance lines by atomic hydrogen, *J. Phys. B.*, 37, 677-688
- Khotyaintsev, Y. , Vaivads, A., Ogawa, Y., Popielawska, B., André, M., Buchert, S., Décréau, P., Lavraud, B., and Rème, H. (2004), Cluster observations of high-frequency waves in the exterior cusp, *Annales Geophysicae*, 22(7), 2403-2411.
- Kim K.-H., Cattell C. A., Lee D.-H., Balogh A., Lucek E., André M., Khotyaintsev Y., Rème H., "Cluster observations in the magnetotail during sudden and quasiperiodic solar wind variations", *J. Geophys. Res.*, Volume 109, Issue A4, 2004.
- Kis A., Scholer M., Klecker B., Möbius E., Lucek E. A., Rème H., Bosqued J. M., Kistler L. M., Kucharek H., "Multi-spacecraft observations of diffuse ions upstream of Earth's bow shock", *Geophys. Res. Lett.*, Volume 31, Issue 20, 2004.
- Korth A., Fränz M., Zong Q.-G., Fritz T. A., Sauvaud J. A., Rème H., Dandouras J., Friedel R., Mouikis C. G., Kistler L. M., Möbius E., Marcucci M. F., Wilber M., Parks G., Keiling A., Lundin R., Daly P. W., "Ion injections at auroral latitude during the March 31, 2001 magnetic storm observed by Cluster", *Geophys. Res. Lett.*, Volume 31, Issue 20, 2004.
- Koutchmy, S.; Baudin, F.; Bocchialini, K.; Daniel, J.-Y.; Delaboudinière, J.-P.; Golub, L.; Lamy, P.; Adjabshirizadeh, A., (2004), The Aug. 11th, 1999 CME, *Astron. Astrophys.* 420, 709.
- Krasnoselskikh, V. and Dudok de Wit, T., (2004), Preface "Spatio-temporal analysis and multipoint measurements in space (STAMMS)", *Annales Geophysicae*, 22(7), 2289-2289.
- Kretschmar, M, J. Liliensten and J. Abouadarham, (2004), Variability of the EUV quiet sun emission and reference spectrum using SUMER, *Astronomy and Astrophysics*, 419, 345–356.

Kucharek, H. , Möbius, E., Scholer, M., Mouikis, C., Kistler, L. M., Horbury, T., Balogh, A., Réme, H., and Bosqued, J. M., (2004), On the origin of field-aligned beams at the quasi-perpendicular bow shock: multi-spacecraft observations by Cluster, *Annales Geophysicae*, 22,(7), 2301-2308.

Kuznetsov, E., Passot, T. and P.L. Sulem, (2004), Compressible dynamics of magnetic field lines for incompressible MHD flows, *Phys. Plasmas*, 11, 1410.

Lallement R., (2004), On the contribution of charge-exchange induced X-ray emission in the ISM and ICM, *Astron. Astrophys.*, 422, p.391-400

Lathuillère, C., and M. Menvielle, (2004), WINDII thermosphere temperature perturbation for magnetically active situations, *J. Geophys. Res.*, 109(11), 11304 ;

Lavraud B., Fedorov A., Budnik E., Grigoriev A., Cargill P., Dunlop M., Rème H., Dandouras J., Balogh A., "Cluster survey of the high-altitude cusp properties: a three-year statistical study", *Ann. Geophys.*, Volume 22, Issue 8, pp.3009-3019, 2004.

Lavraud B., Phan T., Dunlop M., Taylor M., Cargill P., Bosqued J. M., Dandouras J., Rème H., Sauvaud J. A., Escoubet C., Balogh A., Fazakerley A. , " The exterior cusp and its boundary with the magnetosheath: Cluster multi-event analysis ", *Ann. Geophys.*, Volume 22, Issue 8, pp.3039-3054, 2004.

Lefebvre S., Rozelot J.P., (2004), Solar latitude distortions: from observations to theory, *A&A* 419

Lefebvre, S. and Rozelot, J.P. (2004), "A new method to detect active features at the solar limb. (The MIRE SOL programme)". *Solar Physics*, 219, 25-37.

Lemaire P., P. Gouttebroze, J.-C. Vial, W. Curdt, U. Schühle, K. Wilhelm, (2004), Flare observation of the Sun as a star by SUMER/SOHO in the hydrogen Lyman continuum, *Astron. and Astrophys.*, 418, 737

Lembege B., J. Giacalone J., M. Scholer, T. Hada, M. Hoshino, V. Krasnoselskikh, H. Kucharek, P. Savoini And T. Terasawa, (2004), Selected problems in collisionless shocks Physics (review), *Space Science Rev.*, 110, 161-226

Louarn P., Fedorov A., Budnik E., Fruit G., Sauvaud J. A., Harvey C. C., Dandouras J., Rème H., Dunlop M. C., Balogh A., "Cluster observations of complex 3D magnetic structures at the magnetopause", *Geophys. Res. Lett.*, Volume 31, Issue 19, CiteID L19805, 2004.

Louarn, P., G. Fruit, E. Budnik, J.A. Sauvaud, C. Jacquy, H. Rème, E. Lucek, A. Balogh, D. LeQuéau, (2004), On the propagation of low frequency fluctuations in the plasma sheet: 1 CLUSTER observations and MHD analysis, *J. Geophys. Res.*, 109(3), 3216

Lucek E. A., Horbury T. S., Balogh A., Dandouras J., Rème H., "Cluster observations of hot flow anomalies", *J. Geophys. Res.*, Volume 109, Issue A6, 2004.

Lucek, E. A. , Horbury, T. S., Balogh, A., Dandouras, I., and Rème, H., (2004), Cluster observations of structures at quasi-parallel bow shocks, *Annales Geophysicae*, Volume 22, Number 7., Page(s) 2309-2313.

Madjarska, M.S., Doyle, J.G., and van Driel-Gesztelyi, L. (2004), First evidence for magnetic reconnection along coronal hole boundaries., *Astrophys. J.*, 603, L57.

Maia D. Pick M., (2004), Revisiting the origin of impulsive electron events : coronal magnetic restructuring, *ApJ*, 609, 1082-1097.

Malherbe J-M., Roudier Th., Mein P., Moity J. and Muller R. (2004), High resolution solar magnetometry with the spectrograph of the Pic du Midi Turret Dome., *A&A*, 427,745.

- Mandrini, C.H., Démoulin, P., van Driel-Gesztelyi, L., (2004), The magnetic helicity budget of solar active regions from the photosphere to magnetic clouds., *Astrophys. Space Sci*, 290, No. 3-4, 319.
- Marchaudon, A., J.-C. Cerisier, J.-M. Bosqued, M. W. Dunlop, J. A. Wild, P. M. E. Decreau, M. Forster, D. Fontaine, H. Laakso, (2004), Transient plasma injections in the dayside magnetosphere: one to one correlated observations by Cluster and SuperDARN, *Ann. Geophysicae*, 22, 141-158.b.
- Marchaudon, A., J.-C. Cerisier, O. Amm, M. Lester, C. W. Carlson, G. K. Parks, (2004), Quantitative modelling of the closure of meso-scale parallel currents in the nightside ionosphere, *Ann. Geophysicae*, 22, 125-140.a.
- Marchaudon, A., J.-C. Cerisier, R. A. Greenwald, and G. Sofko, (2004), Electrodynamics of a Flux Transfer Event: experimental test of the Southwood model, *Gephys. Res. Lett.*, 31(9), 9809.
- Marcucci M. F., Bavassano Cattaneo M. B., Pallocchia G., Amata E., Bruno R., Di Lellis A. M., Formisano V., Rème H., Bosqued J. M., Dandouras J., Sauvaud J. A., Kistler L. M., Moebius E., Klecker B., Carlson C. W., Parks G. K., McCarthy M., Korth A., Lundin R., Balogh A., "Energetic magnetospheric oxygen in the magnetosheath and its response to IMF orientation: Cluster observations", *J. Geophys. Res.*, Volume 109, Issue A7, 2004.
- Marqué C., (2004), Radio metric observations of quiescent filament cavities, *Astrophys. J.*, 602, 1037-1050.
- Masson, A. , Inan, U. S., Laakso, H., Santolík, O., and Décreau, P., (2004), Cluster observations of mid-latitude hiss near the plasmopause, *Annales Geophysicae*, 22(7), 2565-2575.
- Mazelle, C., D. Winterhalter, K. Sauer, J.G. Trotignon, M.H. Acuña, K. Baumgärtel, C. Bertucci, D.A. Brain, S.J. Brecht, M.Delva, E. Dubinin, M. Øieroset, And J. Slavin, (2004), Bow Shock And Upstream, Phenomena At Mars, *Space Science Reviews*, 111, 115-181.
- McKenna-Lawlor S., Balaz J., Strharsky I., Barabash S., Brinkfeldt K., Li L., Shen C., Shi J., Zong Q., Kudela K., Fu S., Roelof E.C., Son B.P.C., Dandouras J., "The energetic NeUtral Atom Detector Unit (NUADU) for China s Double Star Mission and its calibration", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A*, Volume 530, Issue 3, p. 311-322, 2004.
- Meunier N., (2004), Complexity of active regions: flares and cycle phase dependence, *Astronom. Astrophys.*, 420, 333
- Meziane, K. , Mazelle, C., Wilber, M., LeQuéau, D., Eastwood, J. P., Rème, H., Dandouras, I., Sauvaud, J. A., Bosqued, J. M., Parks, G. K., Kistler, L. M., McCarthy, M., Klecker, B., Korth, A., Bavassano-Cattaneo, M. -B., Lundin, R., and Balogh, A., (2004), Bow shock specularly reflected ions in the presence of low-frequency electromagnetic waves: a case study, *Annales Geophysicae*, 22,(7)2325-2335.
- Meziane, K., M. Wilber, C. Mazelle, D. Le Quéau, H. Kucharek, H.Rème, J.A. Sauvaud, J.M. Bosqued, I. Dandouras, G.K. Parks, M.Mccarthy, B. Klecker, A. Korth, M.B. Bavassano-Cattaneo, R.Lundin, And E. Lucek, (2004), Simultaneous observations of field-aligned beams and gyrating ions in the terrestrial foreshock, *J. Geophys. Res.*, Vol. 109(5), 5107.
- Milan, S.E., M. Lester, T.K. Yeoman, M.V. Uspensky, and J.-P. Villain, (2004), Evidence for high-aspect angle HF radar backscatter from the E region, *Ann. Geophys.*, 22, 829-847.
- Morooka M., André M., Wahlund J.-E., Buchert S. C., Fazakerley A. N., Winningham J. D., Rème H., Dandouras J., Lavraud B., Balogh A., Igenbergs K., "Cluster observations of ULF waves with pulsating electron beams above the high latitude dusk-side auroral region", *Geophys. Res. Lett.*, Volume 31, Issue 5, 2004.

- Müller, W.-C., Grappin, R., (2004), The residual energy in freely decaying magnetohydrodynamic turbulence, *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 46, Issue 12B, pp. B91-B96
- Nakamura R., Baumjohann W., Mouikis C., Kistler L. M., Runov A., Volwerk M., Asano Y., Vörös Z., Zhang T. L., Klecker B., Rème H., Balogh A., "Spatial scale of high-speed flows in the plasma sheet observed by Cluster", *Geophys. Res. Lett.*, Volume 31, Issue 9, 2004.
- Nakamura R., Baumjohann W., Nagai T., Fujimoto M., Mukai T., Klecker B., Treumann R., Balogh A., Rème H., Sauvaud J. A., Kistler L., Mouikis C., Owen C. J., Fazakerley A. N., Dewhurst J. P., Bogdanova Y. , "Flow shear near the boundary of the plasma sheet observed by Cluster and Geotail", *J. Geophys. Res.*, Volume 109, Issue A5, 2004.
- Narita, Y. , Glassmeier, K. -H., Schäfer, S., Motschmann, U., Fränz, M., Dandouras, I., Fornaçon, K. -H., Georgescu, E., Korth, A., Rème, H., and Richter, I. (2004), Alfvén waves in the foreshock propagating upstream in the plasma rest frame: statistics from Cluster observations, *Annales Geophysicae*, 22(7), 2315-2323.
- Nilsson, H. , Joko, S., Lundin, R., Rème, H., Sauvaud, J. -A., Dandouras, I., Balogh, A., Carr, C., Kistler, L. M., Klecker, B., Carlson, C. W., Bavassano-Cattaneo, M. B., and Korth, A., (2004), The structure of high altitude O⁺ energization and outflow: a case study, *Annales Geophysicae*, 22(7), 2497-2506.
- Nykyri, K. , Cargill, P. J., Lucek, E., Horbury, T., Lavraud, B., Balogh, A., Dunlop, M. W., Bogdanova, Y., Fazakerley, A., Dandouras, I., and Rème, H., (2004), Cluster observations of magnetic field fluctuations in the high-altitude cusp, *Annales Geophysicae*, 22(7), 2413-2429.
- Owen C., Taylor M., Krauklis I., Fazakerley A., Dunlop M., Bosqued J. M., "Cluster observations of surface waves on the dawn flank magnetopause", *Ann. Geophys.*, Volume 22, Issue 3, pp.971-983, 2004.
- Parenti S., J.-C. Vial, P. Lemaire, (2004), Prominence Atlas in the SUMER range 800 -1250 Å : I. Observations, data reduction and preliminary results, *Solar Physics*, 220, 61
- Pariat E., Aulanier G., Schmieder B., Rust D., Georgoulis M.K., Bernasconi P.N., (2004), Resistive emergence of undulatory flux tubes., *ApJ*, 614, 1099-1112.
- Parrot, M. , Santolík, O., Gurnett, D. A., Pickett, J. S., and Cornilleau-Wehrlin, N., (2004), Characteristics of magnetospherically reflected chorus waves observed by CLUSTER, *Annales Geophysicae*, 22(7), 2597-2606.
- Passot, T., and P.L. Sulem, (2004), A fluid description for Landau damping of dispersive MHD waves, *Nonlinear Proc. Geophys.*, 11, 245.
- Passot, T., and P.L. Sulem, (2004), A Landau fluid model for dispersive magneto-hydrodynamics, *Phys. Plasmas*, 11, 5173.
- Passot, T., and P.L. Sulem, (2004), Alfvén wave filamentation: from Hall-MHD to kinetic theory, *Physica Scripta*, T113, 89.
- Pepino R., V. Kharchenko, A. Dalgarno, and R. Lallement, (2004), Spectra of the X-Ray Emission Induced in the Interaction between the Solar Wind and the Heliospheric Gas, *Astroph. J.*, 617 , . 1347
- Phan, T. D. , Dunlop, M. W., Paschmann, G., Klecker, B., Bosqued, J. M., Rème, H., Balogh, A., Twitty, C., Mozer, F. S., Carlson, C. W., Mouikis, C., and Kistler, L. M., (2004), Cluster observations of continuous reconnection at the magnetopause under steady interplanetary magnetic field conditions, *Annales Geophysicae*, 22(7), 2355-2367.

Pickett J., Kahler S., Chen L., Huff R., Santolík O., Khotyaintsev Y., Décréau P., Winningham D., Frahm R., Goldstein M., Lakhina G., Tsurutani B., Lavraud B., Gurnett D., Cornilleau-Wehrin N., André M., Fazakerley A., Balogh A., Rème H., "Solitary waves observed in the auroral zone: the Cluster multi-spacecraft perspective", *Nonlinear Processes in Geophysics*, Volume 11, Issue 2, pp.183-196, 2004.

Pitout, F., Escoubet, C. P., and Lucek, E. A., (2004), Ionospheric plasma density structures associated with magnetopause motion: a case study using the Cluster spacecraft and the EISCAT Svalbard Radar, *Annales Geophysicae*, 22(7), 2369-2379.

Platino, M., Inan, U. S., Bell, T. F., Pickett, J., Kennedy, E. J., Trotignon, J. G., Rauch, J. L., and Canu, P., (2004), Cluster observations of ELF/VLF signals generated by modulated heating of the lower ionosphere with the HAARP HF transmitter, *Annales Geophysicae*, 22(7), 2643-2653.

Ponty, Y., Politano, H., and J.-F. Pinton, (2004), Simulation of induction at low magnetic Prandtl number, *Phys. Rev. Lett.*, 68, 14, 144503.

Pottelette, R., R. Treumann and Georgescu E., (2004), "Crossing a narrow in altitude turbulent auroral acceleration region", *Nonlinear Processes in Geophysics*, 11, 197-204.

Régnier, S., Amari, T., (2004), 3D magnetic configuration of the Halpa filament and X-ray sigmoid in NOAA AR 8151, *Astronomy and Astrophysics*, 425, 345-352.

Roudier Th. Muller R. (2004) : Relation between families of granules, mesogranules and the photospheric network, *A&A* 419.

Rousselet-Perraut, K., Stehlé, C., Lanz, T., Le Bouquin, J.B. et al., (2004), *A&A*, 422, 193.

Roux A., Baumjohann W., Birn J., Nakamura R., Le Contel O., Hoshino M., Lui A. T. Y., Owen C., Sauvaud J.-A., Vaivads A., Fontaine D., Runov A. (2004) Dynamics of Thin Current Sheets: CLUSTER Observations. *Annales Geophysicae*. ISSN : 0992-7689.

Runov, A., Sergeev, V., Nakamura, R., Baumjohann, W., Vörös, Z., Volwerk, M., Asano, Y., Klecker, B., Rème, H., and Balogh, A., (2004), Properties of a bifurcated current sheet observed on 29 August 2001, *Annales Geophysicae*, 22 (7), 2535-2540.

Sahraoui F., J.L. Pinçon, G. Belmont, L. Rezeau, N. Cornilleau-Wehrin, P. Robert, L. Mellul, J.M. Bosqued, A. Balogh, P. Canu, G. Chanteur, (2004), Correction to "ULF wave identification in the magnetosheath: k-filtering technique applied to Cluster II data", *J. Geophys. Res.*, 108(4), 4222

Sahraoui, F., G. Belmont, J.L. Pinçon, L. Rezeau, N. Cornilleau-Wehrin, A. Balogh, (2004), Magnetic Turbulent Spectra in the Magnetosheath: New Insights, *Annales Geophysicae*, 22, 2283-2288.

Santolík O., Gurnett D., Pickett J.S., Parrot M., Cornilleau-Wehrin N. (2004) A microscopic and nanoscopic view of storm-time chorus on 31 March 2001. *Geophysical Research Letters*. , vol. 31, 10.1029/2003GL018142.

Santolík, O., Nemeček, F., Gereová, K., Macúšová, E., de Conchy, Y., and Cornilleau-Wehrin, N., (2004), Systematic analysis of equatorial noise below the lower hybrid frequency, *Annales Geophysicae*, 22(7), 2587-2595.

Sauvaud J. A., Décréau P., "Cold Ionospheric Ions in the External Dayside Magnetosphere", *Nato Science Series, Series II: Mathematics, Physics and Chemistry, Vol 178, Multiscale Processes in the Earth's Magnetosphere: From Interball to Cluster*, ed. by J.-A. Sauvaud and Z. Nemeček, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, p255, 2004.

Sauvaud J. A., Kovrazhkin R. A., "Two types of energy-dispersed ion structures at the plasma sheet boundary", *J. Geophys. Res.*, Volume 109, Issue A12, 2004.

Sauvaud J. A., Louarn P., Fruit G., Stenuit H., Vallat C., Dandouras J., Rème H., André M., Balogh A., Dunlop M., Kistler L., Möbius E., Mouikis C., Klecker B., Parks G. K., McFadden J., Carlson C., Marcucci F., Pallochchia G., Lundin R., Korth A., McCarthy M., "Case studies of the dynamics of ionospheric ions in the Earth's magnetotail", *J. Geophys. Res.*, Volume 109, Issue A1, 2004

Savin S., Zelenyi L., Romanov S., Sandahl I., Pickett J., Amata E., Avakov L., Blecki J., Budnik E., Büchner J., Cattell C., Consolini G., Fedder J., Fuselier S., Kawano H., Klimov S., Korepanov V., Lagoutte D., Marcucci F., Mogilevsky M., Nemecek Z., Nikutowski B., Nozdrachev M., Parrot M., Rauch J., Romanov V., Romantsova T., Russell C., Safrankova J., Sauvaud J. A., Skalsky A., Smirnov V., Stasiewicz K., Trotignon J., Yermolaev Yu., "Magnetosheath-cusp interface", *Ann. Geophys.*, Volume 22, Issue 1, pp.183-212, 2004.

Schmieder B., Georgoulis M.K., Rust D.M., Démoulin P., Bernasconi P.N., (2004), Emerging flux and heating of coronal loops., *ApJ* 601, 530-545.

Schmieder B., Lin Y., Heinzel P., Schwartz P., (2004), "Multi-wavelength study of a high-latitude EUV filament", *Solar Physics*, 221, 297-323

Schmieder B., Mein N., Deng Y.Y., Dumitrache C., Malherbe J.M., Staiger J., (2004), The formation and evolution of two long curved filaments: TRACE and MSDP observations *Solar Physics*, 223, 119.

Schmieder B., Yong Lin, Heinzel P., Schwartz P., (2004), High latitude filament in EUV lines: SOHO/CDS and SUMER, TRACE., *Solar Phys.* 221, 297.

Schwartz P., Heinzel P., Anzer U., Schmieder B., (2004), Determination of the 3D topology of an EUV filament observed by SOHO and VTT/MSDP., *A & A*, 421, 323.

Seran E., Berthelier J.-J., Lebreton J.-P. (2004) Current collection by a spherical segmented Langmuir probe in the ionospheric plasma: effect of the bulk velocity. *Annales Geophysicae*. ISSN : 0992-7689.

Seran E., Cerisier J.-C. (2004) Current layers : influence of the finite size and non-uniform distribution. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. ISSN : 1364-6826.

Sergeev V., Runov A., Baumjohann W., Nakamura R., Zhang T. L., Balogh A., Louarn P., Sauvaud J. A., Rème H., "Orientation and propagation of current sheet oscillations", *Geophys. Res. Lett.*, Volume 31, Issue 5, 2004.

Sonnerup B. U. Ö., Haaland S., Paschmann G., Lavraud B., Dunlop M. W., Rème H., Balogh A., "Orientation and motion of a discontinuity from single-spacecraft measurements of plasma velocity and density: Minimum mass flux residue", *J. Geophys. Res.*, Volume 109, Issue A3, 2004.

Sorriso-Valvo, L., Carbone, V., Yurchishin, V., Abramenko, V., Noullez, A., Politano, H., Pouquet, A., and P. L. Veltri, (2004), Topological changes of the photospheric magnetic field inside active regions: a prelude to flares, *Planetary and Space Science*, 52, 10, 937.

Stenuit H., Sauvaud J., "Evidence for storm-time ionospheric ion precipitation in the cusp with magnetosheath energy", *Ann. Geophys.*, Volume 22, Issue 5, pp.1765-1771, 2004.

Stepanova M. V., Antonova E. E., Bosqued J. M., Kovrazhkin R., "Azimuthal plasma pressure reconstructed by using the Aureol-3 satellite data during quiet geomagnetic conditions", *Adv. Space Res.*, Volume 33, Issue 5, p. 737-741, 2004.

Stepanova M. V., Antonova E. E., Bosqued J. M., Kovrazhkin R., "Radial plasma pressure gradients in the high latitude magnetosphere as sources of instabilities leading to the substorm onset", *Adv. Space Res.*, Volume 33, Issue 5, p. 761-768, 2004.

- Taylor M., Dunlop M., Lavraud B., Vontrat-Reberac A., Owen C., Décréau P., Trávníček P., Elphic R., Friedel R., Dewhurst J., Wang Y., Fazakerley A., Balogh A., Rème H., Daly P. , " Cluster observations of a complex high-altitude cusp passage during highly variable IMF", *Ann. Geophys.*, Volume 22, Issue 10, pp.3707-3719, 2004.
- Thiébaud B., A. Hilgers, E. Sasot, H. Laakso, P. Escoubet, V. Génot, and J. Forest, "Potential barrier in the electrostatic sheath around a magnetospheric spacecraft", *J. Geophys. Res.*, 109, A12207, 2004.
- Thompson S. M., Kivelson M. G., Khurana K. K., Balogh A., Rème H., Fazakerley A. N., Kistler L. M., "Cluster observations of quasi-periodic impulsive signatures in the dayside northern lobe: High-latitude flux transfer events?", *J. Geophys. Res.*, Volume 109, Issue A2, 2004
- Tsubouchi K. And B. Lembege, (2004), Full particle simulations of short large-amplitude magnetic structures (SLAMS) in quasi-parallel shocks, *J. Geophys. Res.*, 109(2),2114
- Tur A.V., V.V. Yanovsky, "Point vortices with necklace. New exact stationary solutions of 2-D Euler equation", *Phys. Fluids*, v16, n8, p. 2877, 2004.
- Turck-Chièze S, García R A, Couvidat S, Ulrich R K, Bertello L, Varadi F, Kosovichev A G, Gabriel A H, Berthomieu G, Brun A S, Lopes I, Pallé P, Provost J, Robillot J M, Roca Cortés T, (2004), "Looking for gravity-mode multiplets with the GOLF experiment aboard SOHO", *Astrophysical Journal*, 604, 455.
- Twitty C., Phan T. D., Paschmann G., Lavraud B., Rème H., Dunlop M., "Cluster survey of cusp reconnection and its IMF dependence", *Geophys. Res. Lett.*, Volume 31, Issue 19, 2004.
- Tziotziou K., Tsiropoula G. and Mein P., (2004), On the nature of the chromospheric fine structure II. Intensity and velocity oscillations of dark mottles and grains., *A&A*, 423,1133.
- Vaith, H. , Paschmann, G., Quinn, J. M., Förster, M., Georgescu, E., Haaland, S. E., Klecker, B., Kletzing, C. A., Puhl-Quinn, P. A., Rème, H., and Torbert, R. B., (2004), Plasma convection across the polar cap, plasma mantle and cusp: Cluster EDI observations, *Annales Geophysicae*, Volume 22, Number 7., Page(s) 2451-2461.
- Vaivads A., Aandre, M., Buchert S., Wahlund J-E., Fazakerley A., Cornilleau-Wehrin N. (2004) Cluster Observations of lower hybrid turbulence at the magnetopause. *Journal of Geophysical research*. ISSN : 0148-0227. , vol. 31, 10.1029/2003GL018142.
- Vallat C., Dandouras J., Son B.P.C., DeMajistre R., Mitchell D.G., Roelof E.C., Rème H., Sauvaud J. A., Kistler L., Mouikis Ch., Dunlop M., Balogh A., "First comparisons of local ion measurements in the inner magnetosphere with energetic neutral atom magnetospheric image inversions: Cluster-CIS and IMAGE-HENA observations", *J. Geophys. Res.*, Volume 109, Issue A4, 2004.
- Vallières, X. J.-P. Villain, C. Hanuise, and R. André, (2004), Ionospheric propagation effects on spectral widths measured by SuperDARN HF radars, *Ann. Geophys.*, 22, 2023-2031.
- Volwerk M., Baumjohann W., Glassmeier K., Nakamura R., Zhang T., Runov A., Vörös Z., Klecker B., Treumann R., Bogdanova Y., Eichelberger H., Balogh A., Rème H., "Compressional waves in the Earth s neutral sheet", *Ann. Geophys.*, Volume 22, Issue 1, pp.303-315, 2004.
- Volwerk M., Glassmeier K.-H., Runov A., Nakamura R., Baumjohann W., Klecker B., Richter I., Balogh A., Rème H., Yumoto K., "Flow burst-induced large-scale plasma sheet oscillation", *J. Geophys. Res.*, Volume 109, Issue A11, 2004.
- Volwerk, M. , Vörös, Z., Baumjohann, W., Nakamura, R., Runov, A., Zhang, T. L., Glassmeier, K. - H., Treumann, R. A., Klecker, B., Balogh, A., and Rème, H. , (2004), Multi-scale analysis of turbulence in the Earth's current sheet, *Annales Geophysicae*, 22(7), 2525-2533.

Vörös Z., Baumjohann W., Nakamura R., Volwerk M., Runov A., Zhang T. L., Eichelberger H. U., Treumann R., Georgescu E., Balogh A., Klecker B., Rème H., "Magnetic turbulence in the plasma sheet", *J. Geophys. Res.*, Volume 109, Issue A11, 2004.

Walker, S. N. , Alleyne, H. St. C. K., Balikhin, M. A., André, M., and Horbury, T. S., (2004), Electric field scales at quasi-perpendicular shocks, *Annales Geophysicae*, 22(7), 2291-2300.

Walker, S.N., F. Sahraoui, M. A. Balikhin, G. Belmont, J.L. Pinçon, L. Rezeau, H. Alleyne, N. Cornilleau-Wehrin, M. Andre, (2004), A Comparison of Wave Mode Identification Techniques, *Annales Geophysicae*, 22, 3021-3032.

Wilber M., Lee E., Parks G. K., Meziane K., Carlson C. W., McFadden J. P., Rème H., Dandouras J., Sauvaud J. A., Bosqued J. M., Kistler L., Möbius E., McCarthy M., Korth A., Klecker B., Bavassano-Cattaneo M.-B., Lundin R., Lucek E., "Cluster observations of velocity space-restricted ion distributions near the plasma sheet", *Geophys. Res. Lett.*, Volume 31, Issue 24, 2004.

Wild J., Milan S., Owen C., Bosqued J. M., Lester M., Wright D., Frey H., Carlson C., Fazakerley A., Rème H., "The location of the open-closed magnetic field line boundary in the dawn sector auroral ionosphere", *Ann. Geophys.*, Volume 22, Issue 10, pp.3625-3639, 2004.

Zhukov, A. and Auchère, F., (2004), On the nature of EIT waves, EUV dimmings and their link to CMEs, *Astron. Astrophys.* 427, 705-716.

Zong Q.-G., Fritz T. A., Pu Z. Y., Fu S. Y., Baker D. N., Zhang H., Lui A. T., Vogiatzis I., Glassmeier K.-H., Korth A., Daly P. W., Balogh A., Rème H., "Cluster observations of earthward flowing plasmoid in the tail", *Geophys. Res. Lett.*, Volume 31, Issue 18, 2004.

Zong Q.-G., Fritz T. A., Zhang H., Korth A., Daly P. W., Dunlop M. W., Glassmeier K.-H., Rème H., Balogh A., "Triple cusps observed by Cluster-Temporal or spatial effect?", *Geophys. Res. Lett.*, Volume 31, Issue 9, 2004.

Zouganelis, I., M. Maksimovic, N. Meyer-Vernet, H. Lamy, K. Issautier, (2004), A Transonic Collisionless Model of the Solar Wind, *Astrophys. J.*, 606, 542-554.

5. Publications 2005

Aiouaz T., Peter H., Lemaire P., (2005), "The correlation between coronal Doppler shifts and the supergranular network, *Astronomy and Astrophysics*, 435, 713

Alexeev I. V., Owen C. J., Fazakerley A. N., Runov A., Dewhurst J. P., Balogh A., Rème H., Klecker B., Kistler L., "Cluster observations of currents in the plasma sheet during reconnection", *Geophys. Res. Lett.*, Volume 32, Issue 3, 2005.

Amari, T., Luciani, J.F., Aly, J.J., (2005), Non-Current-Free Coronal Closure of Subphotospheric MHD Models, *Astrophys. Journal.*, 629, L37-40.

Amari, T., Boulmezaoud, T. Z., Aly, J.J., D., (2005), "Well Posed Reconstruction of the Solar Coronal Magnetic Field", *Astronomy and Astrophysics*, in press.

Archer M., T.S. Horbury, E.A. Lucek, C. Mazelle, A. Balogh, and J. Dandouras, "Size and shape of ULF waves in the terrestrial foreshock", *J. Geophys. Res.*, 110, A05208, 2005.

Artzner G., Delaboudinière J.-P., Auchère F. et Bougnet M., (2005), « An Atlas of Solar events : 1996-2005 », accepté par *Advances in Space Research*

Asano Y., Nakamura R., Baumjohann W., Runov A., Vörös Z., Volwerk M., Zhang T. L., Balogh A., Klecker B., Rème H., "How typical are atypical current sheets?", *Geophys. Res. Lett.*, Volume 32, Issue 3, 2005.

Auchère F., (2005), "Effect of the H I Ly α Chromospheric Flux Anisotropy on the Total Intensity of the Resonantly Scattered Coronal Radiation", *The Astrophysical Journal*, 622, 737-743

Auchère F., Pouget G., Bocchialini K., (2005), « On the interpretation of long periods detected in solar EUV intensity time series », *A&A*, soumis.

Auchère F., Cook J. W., Newmark J. S., McMullin D. R., von Steiger R., Witte M., (2005), "Model of the all-sky He II 30.4 nm solar flux", *Advances in Space Research*, 35,388-392

Auchère F., Cook J. W., Newmark J. S., McMullin D. R., von Steiger R., Witte M., (2005), "The Heliospheric He II 30.4 nm Solar Flux During Cycle 23", *The Astrophysical Journal*, Volume 625, Issue 2, pp. 1036-1044

Aulanier, G., Démoulin P., Grappin R., (2005), Equilibrium and observational properties of line-tied twisted flux tubes, *Astronomy and Astrophysics*, 430, 1067-1087.

Balogh, S. J. Schwartz, S. D. Bale, M. A. Balikhin, D. Burgess, T. S. Horbury, V. V. Krasnoselskikh, H. Kucharek, B. Lembege, E. A. Lucek, E. Mobius, M. Scholer, M. F. Thomsen, And S. N. Walker, (2005), The Bow Shock (review) in the book "Dayside Magnetospheric Boundaries: Cluster Results", *Space Science Rev*, in press

Baudin F., Ibarra E., Bocchialini K., Costa A., Lemaire P., Rovira M., Vial J.-C., (2005), A contribution to the understanding of chromospheric oscillations , *Solar Physics*, soumis

Belmont, G., F. Sahraoui, L. Rezeau, (2005), Measuring and understanding space turbulence, *Adv. Space Science*, in press.

Berlicki A., Heinzl P., Schmieder B., Mein P., Mein N., (2005), "Non-LTE diagnostics of velocity fields during the gradual phase of a solar flare", *Astronomy and Astrophysics*, 430, 679-689

Bertucci C., N. Achileos, C.T. Russell, M.K. Dougherty, E.J. Smith, M. Burton, B.T. Tsurutani, C. Mazelle, "Bow Shock and Upstream Waves at Jupiter and Saturn: Cassini Magnetometer observations", in *The Physics of Collisionless Shocks*, American Institute of Physics, 781, pp. 109-115, Melville, New York, 2005

Bertucci, C., C. Mazelle, And M.H. Acuña, (2005), Structure and variability of the Martian MPB and bow shock from MGS MAG/ER observations, *Adv. Space Res.*, in press.

Blelly, P.L., C. Lathuillère, B. Emery, J. Lilensten, J. Fontanari and D. Alcaydé, (2005), An extended TRANSCAR model including ionospheric conection: simulation of EISCAT observations using inputs from AMIE, *Ann. Geophys.*, 23, 419-431

Bommier, V., M. Derouich, E. Landi Degl'Innocenti, G. Molodij, and S. Sahal-Bréchet (2005), Interpretation of second solar spectrum observations of the Sr I 4607 Å line in a quiet region: turbulent magnetic field strength determination", *Astron. Astrophys.* 432, pp. 295-305

Bosqued, J.-M., C. P. Escoubet, H. Frey, M. Dunlop, J. Berchem, A. Marchaudon, J.-C. Cerisier, A. Fazakerley, B. Lavraud, H. Rème, H. Laakso, A. Balogh, (2005), Multipoint observations of transient reconnection signatures in the dayside cusp precipitation: A CLUSTER-IMAGE detailed case study, *J. Geophys. Res.*, 110(3),3219.

Boulbe, Boulmezaoud, Amari, (2005), "A new algorithm for computing 3D non linear force-free fields", *S.I.A.M Journal on Scientific Computing*, in press.

Buchlin, E., Galtier, S., Velli, M., (2005), Influence of the definition of dissipative events on their statistics, *A&A* 436, 355-362.

Bugnon, G., Passot, T., and P.L. Sulem, (2005), Landau-fluid simulations of MHD-wave instabilities in a warm collisionless plasma, *Nonlin. Proc. Geophys.* 11, 609.

Casini, R., Bevilacqua, R., & López Ariste, A., (2005), Principal Component Analysis of the He I D3 Polarization Profiles from Solar Prominences, *Astrophysical Journal*, 622, 1265

Cerisier, J.-C., A. Marchaudon, J. M. Bosqued, K. McWilliams, H. Frey, M. Bouhram, H. Laakso, M. Dunlop, M. Förster, A. Fazakerley, (2005), Signatures of plasma injections in the cusp triggered by solar wind pressure pulses, *J. Geophys. Res.*, sous presse

Chisham, G., M.P. Freeman, T. Sotirelis, J.-P. Villain, (2005), A statistical comparison of SuperDARN spectral width boundaries and DMSP particle precipitation boundaries in the morning sector ionosphere, *Ann. Geophys.*, 23, 733-743.

Chust T., Roux A., Kurth W. S., Gurnett D. A., Kivelson M. G., Khurana K. K. (2004) Are the Io's Alfvén wings filamented ; Galileo observations. *Planetary and Space Science*. ISSN : 0032-0633. , to be published.

Coco, I., E. Amata, M.F. Marcucci, M. De Laurentis, J.-P. Villain, C. Hanuise, M. Candidi, (2005), Effects on SuperDARN HF radars echos of sudden impulses of solar wind dynamic pressure, *Ann. Geophys.*, sous presse.

Culot, F., C. Lathuillère and J. Lilensten, (2005), Influence of geomagnetic activity on the OI 630.0 and 557.7 nm dayglow, *J. Geophys. Res.*, Vol. 110(1), 1304.

Dandouras J., V. Pierrard, J. Goldstein, C. Vallat, G.K. Parks, H. Rème, C. Gouillart, F. Sevestre, M.McCarthy, L.M. Kistler, B. Klecker, A. Korth, M. B. Bavassano-Cattaneo, P. Escoubet, A. Masson "Multipoint observations of ionic structures in the Plasmasphere by CLUSTER - CIS and comparisons

with IMAGE-EUV observations and with Model Simulations”, sous presse, AGU Monograph: Global Physics of the Coupled Inner Magnetosphere, 2005.

Darrouzet F., Lemaire J., Decreau P.M.E., De Keyser J., Masson A., Gallagher L., Santolik D., Sandel B.R., Trotignon J.G., Rauch J.L., Le Guirriec E., Canu P., Sedgmore F., Andre M. (2004) Density structures inside the plasmasphere: Cluster observations. *Annales Geophysicae*. ISSN : 0992-7689. , soumis.

Dauphin, C., N. Vilmer, T. Lüthi, G. Trottet, S. Krucker , A. Magun, (2005), Modulations of Broad-Band Radio Continua and X-ray Emissions in the Large X-ray flare on 03 November 2003, *Adv. Space Res.*, 35(10), 1805.

Delaboudiniere J.P., S. Koutchmy, J-C. Noens and V. A. Slemzin. (2005), The Fast Limb-CME of Dec. 2, 2003. *Adv. Space Res.*. (in press).

Delcourt, D. C., Malova, H. V.; Zelenyi, L. M.; Sauvaud, J.-A., Moore, T. E., Fok, M.-C., “Energetic particle injections into the outer cusp during compression events, Earth”, *Planets and Space*, Volume 57, p. 125-130, 2005.

Démoulin P., (2005), Extending the concept of separatrices to QSLs for magnetic reconnection, *Advances in Space Research*, in press

Derouich, M., S. Sahal-Bréchet, and P. S. Barklem (2005), Collisional depolarization of the lines of complex atoms/ions by neutral hydrogen, *Astron. Astrophys.*, 434, 779-784

Derouich, M., S. Sahal-Bréchet, and P. S. Barklem (2005), Spin depolarizing effect in collisions of simple/complex atoms in spherically symmetric states with neutral hydrogen, *Astron. Astrophys.*, 441, 395

Drayton, R.A., A.V. Koustov, M.R. Hairston, and J.-P. Villain, (2005), Comparison of DMSP cross-track ion drifts and SuperDARN line-of-sight velocities, *Ann. Geophys.*, sous presse.

Dreher, J., Grauer, R., Laveder, D., Passot, T., and P.L. Sulem, (2005), Formation and disruption of Alfvénic filaments in Hall-magnetohydrodynamics, *Phys. Plasmas*. 12, 052319-1.

Dudok de Wit T., J. Liliensten, J. Abouardham, P.-O. Amblard, and M. Kretschmar, (2005), Retrieving the solar EUV spectrum from a reduced set of spectral lines, *Annales Geophysicae*, soumis.

Eastwood J.P., D.G. Sibeck, J.A. Slavin, M.L. Goldstein, B. Lavraud, M. Sitnov, S. Imber, A. Balogh, E.A. Lucek, J. Dandouras, “Observations of multiple X-line structure in the Earth’s magnetotail current sheet: A Cluster case study”, *Geophys. Res. Lett.*, 32, 2005.

Eastwood, J.P., A. Balogh, E. Lucek, C. Mazelle, and J. Dandouras, “Quasi-monochromatic ULF foreshock waves as observed by the four-spacecraft Cluster mission: 1. Statistical Properties”, *J. Geophys. Res.*, in press , 2005.

Eastwood, J.P., A. Balogh, E. Lucek, C. Mazelle, and J. Dandouras, “Quasi-monochromatic ULF foreshock waves as observed by the four-spacecraft Cluster mission: 2. Oblique Propagation”, *J. Geophys. Res.*, in press, 2005.

Eastwood, J.P., E. A. Lucek, Y. Narita, C. Mazelle, K. Meziane, J. Pickett, R. A. Treumann, And P. Decreau, (2005), Outer Magnetospheric Boundaries: Cluster Results, *Space Science. Reviews*, in press.

Fazakerley, A.N., L.K. Harra, L.K., J.L. Culhane, L. van Driel-Gesztelyi, E. Lucek, S.A. Matthews, C.J. Owen, C. Mazelle, A. Balogh, and H. Rème, "Relating in situ observations of an interplanetary coronal mass ejection to the conditions at its site of origin in the solar corona", *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 32, L13105, 2005.

Fazakerley, A.N., L.K. Harra, L.K., S.A. Matthews, C.J. Owen, L. van Driel-Gesztelyi, J.L. Culhane, E. Lucek, A. Balogh, C. Mazelle, and H. Rème, "The Chinese New Year Interplanetary Coronal Mass Ejection", *Adv. Space Res.*, in press, 2005

Fuller N., Abouharham J., Bentley R.D., (2005), Filament recognition and image cleaning on Meudon Ha spectroheliograms., *accepted*, *Solar Physics*, 227, 61

Garcia R.A., S. Turck-Chièze, P. Boumier, J.M. Robillot, L. Bertello, J. Charra, H. Dzitko, A.H. Gabriel, S.J. Jiménez-Reyes, P.L. Pallé, C. Renaud, T. Roca Cortés, and R.K. Ulrich, (2005), Global solar Doppler velocity determination with the GOLF/SoHO instrument, *A&A*, 442, 345.

Geach J., S.J. Schwartz, V. Génot, O. Moullard, A. Lahiff, and A. N. Fazakerley, "A corrector for spacecraft calculated electron moments", *Ann. Geophys.*, 23, 931, 2005.

Génot V., Mottez F., Fruit G., Louarn P., Sauvaud J. A., Balogh A. , "Bifurcated current sheet: model and Cluster observations", *Planetary and Space Science*, Volume 53, Issue 1-3, p. 229-235., 2005.

Génot, V., Comment on "A class of exact two-dimensional kinetic current sheet equilibria" by Peter H. Yoon and Anthony T. Y. Lui, *J. Geophys. Res.*, 110, A09214, 2005.

Grappin R., J. Léorat, S. Rifai Habbal, (2005), Siphon flows and oscillations in long coronal loops due to Alfvén waves *A&A*, 437, 1081.

Grigorenko E. E., Fedorov A. O., Budnik E. Yu., Sauvaud J. A., Zelenyi L. M., Rème H., Dunlop M. W. , " Spatial structure of beamlets according to Cluster observations ", *Planetary and Space Science*, Volume 53, Issue 1-3, p. 245-254., 2005.

Grechnev, V, I. Chertok, V. Slemzin, S. Kuzin, A. Ignatiev, A. Pertsov, I. Zhitnik, J.-P. Delaboudiniere, (2005), CORONAS-F/SPIRIT EUV observations of October-November 2003 solar eruptive events in combination with SOHO/EIT data, *Journal of Geophysical Research*, 110(9), 931

Grison, B., F. Sahraoui, B. Lavraud, T. Chust, N. Cornilleau-Wehrin, A. Balogh, M. Andre, (2005), Wave-particle interaction in the distance cusp region : a Cluster case study, *Ann. Geophys*, *soumis*

Gulisano, A.M., Dasso, S., Mandrini, C.H., Démoulin, P., (2005), Magnetic helicity of interplanetary clouds. A statistical study, *Journal of Solar-Terrestrial Physics*, in press.

Hanuise, C., J.-C. Cerisier, F. Auchère, K. Bocchialini, S. Bruinsma, N. Cornilleau-Wehrin, N. Jakowski, C. Lathuillere, M. Menvielle, J.-J. Valette, N. Vilmer, J. Watermann, P. Yaya, (2005), From the Sun to the Earth: impact of the 27-28 May 2003 solar events on the magnetosphere, ionosphere and thermosphere, *Annales Geophysicae*, *soumis*.

Harra, L.K., Démoulin, P., Mandrini, C.H., Matthews, S.A., van Driel-Gesztelyi, L., Culhane, J.L., Fletcher, L., (2005), Flows in the solar atmosphere due to the eruptions on the 15 July, 2002, *A&A*, 438, 1099.

Isham, B, M.T., Rietveld, F. Forme, E. Mjølhus, P. Guio, T. Grydeland and C. La Hoz, (2005), Cavitating Langmuir turbulence observed during the passage of an auroral arc, *Nature*

Issautier, K., C. Perche, S. Hoang, C. Lacombe, M. Maksimovic, J.-L. Bougeret, C. Salem, (2005), Wind in situ thermal noise measurements of the solar wind electron density and temperature over solar cycle 23, *Adv. Space Res.*, 35(12), 2141-2146.

Keiling A., G. K. Parks, H. Rème, J. Dandouras, J. M. Bosqued, M. Wilber, M. McCarthy, C. Mouikis, E. Amata, B. Klecker, A. Korth, R. Lundin, H. U. Frey, "Bouncing ion clusters in the plasma sheet boundary layer observed by Cluster-CIS", *Journal of Geophysical Research*, 110, A09207, 2005.

Kistler L. M., Mouikis C., Möbius E., Klecker B., Sauvaud J. A., Rème H., Korth A., Marcucci M. F., Lundin R., Parks G. K., Balogh A., "Contribution of nonadiabatic ions to the cross-tail current in an O⁺ dominated thin current sheet", *J. Geophys. Res.*, Volume 110, Issue A6, 2005.

Klein K.-L., A. Posner, (2005), The onset of solar energetic particle events: prompt release of deka-MeV protons and associated coronal activity, *Astron. Astrophys.*, 438, 1029.

Klein K.-L., S. Krucker, G. Trottet, S. Hoang, (2005), Coronal phenomena at the release of solar energetic electron events, *Astron. Astrophys.* 431, 1047.

Koutchmy, S. and Molodensky, M., (2005), "Magnetic Configurations of Streamer Structures in the Solar Corona", *Astronomy Letters*, Vol. 31, N6, pp. 398-405

Koutchmy, S. and Nikogossian, (2005), Analysis of the Radiation of Coronal Suprathermal Streams", *A.G. 2005, Astrophysics*, Vol. 48, N1, pp. 61-66

Kundu M.R., G. Trottet, V.I. Garaimov, P.C. Grigis, E.J. Schmahl, (2005), RHESSI and radio imaging observations of microflares, *Adv. Space Res.*,35(10), 1778-1784

Lallement R., Quémerais E., Bertaux J.L., Koutroumpa D., Ferron S., Pellinen R., (2005), Deflection of the Interstellar neutral Hydrogen Flow across the Heliospheric Interface : *Science*, 307 (5714), 1447

Lavraud B., Fedorov A., Budnik E., Thomsen M. F., Grigoriev A., Cargill P. J., Dunlop M. W., Rème H., Dandouras J., Balogh A. , "High-altitude cusp flow dependence on IMF orientation: A 3-year Cluster statistical study", *J. Geophys. Res.*, Volume 110, Issue A2, 2005.

Lembege B., P.L. Pritchett, M.V. Goldman, And D.L. Newman, (2005), Kinetic and nonlinear processes in space plasmas, *Review of Radio Science*, sous presse.

Lilensten, J, Lj R Cander, M. Rietveld and P.S Cannon and M. Barthélémy (2005), Comparison of EISCAT and ionosonde data. Application to a ground based ionospheric segment of space weather program, *Annales Geophysicae*, 23, 183

López Ariste, A. & Casini, R., (2005), Inference of the magnetic field in spicules from spectropolarimetry of He I D3, *Astronomy and Astrophysics*, 436, 325-331

López Ariste, A., Casini, R., Paletou, F., Tomczyk, S., Lites, B. W., Semel, M., Landi Degl'Innocenti, E., Trujillo Bueno, J., & Balasubramaniam, K. S., (2005), Full Stokes Spectropolarimetry of H α in Prominences, *Astrophysical Journal*, 621, L145-L148

Lui A.T.Y., C. Jacquy, G. S. Lakhina, R. Lundin, T. Nagai, T.-D. Phan, Z. Y. Pu, M. Roth, Y. Song, R. A. Treumann, M. Yamauchi, and L. M. Zelenyi, "Critical Issues on Magnetic Reconnection", *Space Science Review*, 116, p. 497-521, 2005

Lundin R., Yamauchi M., Sauvaud J. A., and A. Balogh, "Magnetospheric plasma boundaries: A test for the frozen-in magnetic theorem", *Ann. Geophys.*, in press, 2005.

Luoni, M.L., Mandrini, C.H., Dasso, S., van Driel-Gesztelyi, L., and Démoulin, P., (2005), Tracing magnetic helicity from the solar corona to the interplanetary space, *J. Atm. Solar-Terr. Phys.*, in press.

Mazelle, C., K. Meziane, M. Wilber, and D. Le Quéau, "Field-aligned and Gyration Ion Beams in a Planetary Foreshock", in *The Physics of Collisionless Shocks*, American Institute of Physics, 781, pp. 89-94, Melville, New York, 2005.

Maksimovic M., I. Zouganelis, J.-Y. Chaufray, K. Issautier, E. Scime, J. Littleton, C.S. Salem, E. Marsch, H. Elliott, D.J. McComas, R.P. Lin., (2005), Radial Evolution of the Electron Distribution Functions in the Fast Solar Wind between 0.3 and 1.5 AU, *Journal of Geophysical Research*, 110(9), 9104.

Mandrini, C.H., Pohjolainen, S., Dasso, S., Green, L.M., Démoulin, P., Van Driel-Gesztelyi, L., Copperwheat, C., and Foley, C., (2005), Interplanetary flux rope ejected from and X-ray bright point. The smallest magnetic cloud source region ever observed, *A&A*, 434, 725.

Marqué C., A. Posner, K.-L. Klein., (2005), Solar energetic particles and radio-silent fast coronal mass ejections, *Astrophys. J.*, soumis.

Mauas P. J. D., Andretta V., Falchi A., Falciani R., Teriaca L., Cauzzi G., (2005), « Helium Line Formation and Abundance in a Solar Active Region », *The Astrophysical Journal*, 619, 604-612

McKenna-Lawlor S., Balaz J., Strharsky I., Barabash S., Johnsson K., Zhenxing L., Li L., Jin-Bin C., Chao S., Zong Q., Roelof E. C., C. Son Brandt P., Kudela K., Fu S., Dandouras J. , "An overview of the scientific objectives and technical configuration of the NeUtral Atom Detector Unit (NUADU) for the Chinese Double Star Mission", *Planetary and Space Science*, Volume 53, Issue 1-3, p. 335-348, 2005.

Meziane, K., C. Mazelle, "A review of field-aligned beams observed upstream of the bow shock", in *The Physics of Collisionless Shocks*, American Institute of Physics, 781, pp. 116-122, Melville, New York, 2005.

Maia D. , R. Gama, C. Mercier, M. Pick, M. Karlicky, (2005), The radio CME of 2001 April 15, *ApJ.*, soumis.

Mercier C., P. Subramanian, A. Kerdraon, M. Pick, S. Ananthkrishnan, P. Janardhan, (2005), Combining visibilities from the Giant meterwave Radio Telescope and the Nancay Radio Heliograph : high dynamic range snapshot images of the solar corona at 327 MHz, *Astron. Astrophys.*, soumis.

Meunier N., (2005), Large-scale dynamics and polarities of magnetic structures, *Astronom. Astrophys.*, 437, 303

Meunier N., (2005), Large-scale photospheric dynamics below coronal holes, *Astronom. Astrophys.*, in press

Meunier N., (2005), Magnetic network dynamics: activity level, feature size and anchoring depth, *N., Astronom. Astrophys.*, 436, 1075

Meunier N., (2005), Temporal variations in the magnetic network large-scale dynamics, *Astronom. Astrophys.*, 442, 693

Mininni, P., Ponty, Y., Montgomery, D., Pinton, J.-F., Politano, H., and A. Pouquet., (2005), Dynamo regimes with non-helical forcing, *Astrophys. J.*, 626, 853.

Miroshnichenko, L.I., K.-L. Klein, G. Trottet, P. Lantos, E.V. Vashenyuk, Yu. V. Balabin, B.B. Gvozdevsky, (2005), Relativistic nucleon and electron production in the 2003 October 28 Solar Event, JGR, 110(9), 936.

Mitra-Kraev, U., Harra, L.K., Gudel, M., Audard, M., Branduardi-Raymont, G., Kay, H.R.M., Mewe, R., Raassen, A.J.J., van Driel-Gesztelyi, L., (2005), Relationship between X-ray and ultraviolet emission of flares from DMe stars observed by XMM-Newton, A&A, 431, 679.

Miyashita, Y., A. Ieda, Y. Kamide, S. Machida, T. Mukai, Y. Saito, K. Liou, C.-I. Meng, G.K. Parks, M. Nosé, R.W. McEntire, F. Creutzberg, N. Nishitani, H.J. Singer, and J.-P. Villain, (2005), Plasmoids observed in the near-Earth magnetotail at $X \sim -7$ RE, J. Geophys. Res., soumis.

Modolo, R., Chanteur G., Dubinin E., and Matthews A.P., Influence of the solar EUV flux on the Martian plasma environment, Annales Geophysicae, Vol. 23, pp 433-444, 28-2-2005

Muller R., Saldana-Munoz M., Hanslmeier A. (2005), 11-year cyclic variation of the solar granulation, Adv. Space Res.

Mueller W-C., R. Grappin, (2005), Spectral energy dynamics in magnetohydrodynamic turbulence, soumis à Physical Review.

Muschietti L. And B. Lembège, (2005), Electron cyclotron microinstability in the foot of a perpendicular shock: a self-consistent PIC simulation, Advances in Space Research, in press.

Panasenco O., Veselovsky I.S., Zhukov A.N., Yakovchouk O.S., Koutchmy S., Delaboudiniere J.-P., (2005), Dynamics of the loop prominence and coronal mass ejection observed on March 2, 2002. JASR (submitted).

Parenti S., J.-C. Vial, P. Lemaire, (2005), Prominence Atlas in the SUMER range 800-1250 Å II. Line profile properties and ions identifications, Astron. & Astrophys., accepté

Parenti S., P. Lemaire, J.-C. Vial, (2005), Solar H-Lyman continuum observations with SOHO/SUMER, Astron. & Astrophys., accepté

Pariat, E., Démoulin, P., Berger, M.A., (2005), Photospheric flux density of magnetic helicity, A&A, 439, 1191.

Passot, T., Sulem, C., and P.L. Sulem, (2005), Linear versus nonlinear dissipation for critical NLS equation, Physica D. 203, 167.

Pick M, P. Démoulin, S. Krucker, O. Malandraki, D. Maia (2005), Radio and X-ray Signatures of magnetic Reconnection behind an Ejected flux rope, Astrophys. J. , 625, 1019.

Pick M. and D.Maia, (2005), Origin of Complex type III-L events and electron acceleration, Advance in Space Research, 35(10), 1876.

Pickett J. S., Chen L.-J., Kahler S. W., Santolík O., Goldstein M. L., Lavraud B., Décréau P. M. E., KesselR., Lucek E., Lakhina G. S., Tsurutani B. T., Gurnett D. A., Cornilleau-Wehrlin N., Fazakerley A., Rème H., Balogh A., "On the generation of solitary waves observed by Cluster in the near-Earth magnetosheath", Nonlinear Processes in Geophysics, Volume 12, Issue 2, pp.181-193, 2005.

Pohjolainen S., Vilmer N., Khan J.I., and Hillaris A.E., (2005), Early signatures of large-scale field line opening. Multi-wavelength analysis of features connected to a 'halo' CME event, Astron. Astrophys., 434, 329-341.

- Ponty, Y., Mininni, P., Montgomery, D., Pinton, J.-F., Politano, H., and A. Pouquet., (2005), Numerical study of dynamo action at low magnetic Prandtl numbers, *Phys. Rev. Lett.*, 04, 164502.
- Pottelette, R., R. Treumann, (2005), Electron holes in the upward current auroral region, *Geophysical Research Letters*, 32(12), 12104.
- Pottelette, R; and R. Treumann, (2005), "Auroral Acceleration and Radiation", *Lectures Notes in Physics*, Springer series, à paraître.
- Pouget G., Bocchialini K., Solomon J., (2005), "Oscillations in a filament: first observations of long periods on the He I 584.33 Å line, modelling, and diagnostic", *A&A*, soumis.
- Ravelet R., A. Chiffaudel, F. Daviaud et J. Léorat, (2005), « Towards a von Karman dynamo : numerical studies based on experimental flows », accepté.
- Regnier, S., Amari, T., Canfield, D., Self and Mutual Magnetic Helicity in Coronal Magnetic Fields, (2005), *Astronomy and Astrophysics*, 442, 342.
- Rème H., J. Dandouras, C. Aoustin, J.M. Bosqued, J.A. Sauvaud, C. Vallat, P.Escoubet, J.B. Cao, J. Shi, Z. Pu, M. B. Bavassano-Cattaneo, G.K. Parks, C.W. Carlson, B. Klecker, E. Moebius, L. Kistler, A. Korth, R. Lundin, and the HIA team, "The HIA instrument onboard the Tan Ce 1 Double Star near-Equatorial Spacecraft and its first results", *Sous presse, Ann. Geophys.*, 2005.
- Rosenqvist, L., H. Opgenoorth, S. Buchert, I. McCrea, Amm and C.Lathuillère, (2005), Extreme Solar-Terrestrial events of October 2003: High Latitude and Cluster observations of the large geomagnetic disturbance on October 30, *J. Geophys. Res.*, 110(9), 297
- Roux A., Baumjohann W., Birn J., Nakamura R., Le Contel O., Hoshino M., Lui A. T. Y., Owen C., Sauvaud J.-A., Vaivads A., Fontaine D., Runov A. Decreau P.M.E., Le Guirriec E., Rauch J.L., Trotignon J.G., Canu P., Darrouzet F., Lemaire J., Masson A., Harvey C., Andre M., Sedgmore F. (2004) Plasmopause density structures measured by the whisper EFW instruments on-board CLUSTER. *Advances in Space Research*. ISSN : 0273-1177. , to be published
- Roux A., Le Contel O., Perraut S., Robert P., Sauvaud J.-A., Rème H., Baumjohann W., Birn J., Nakamura R., Frey H., Balogh A. (2004) Relation between Thin Current Sheets and Fast Flows: CLUSTER Observations. *Annales Geophysicae*. ISSN : 0992-7689.
- Runov A., Sergeev V. A., Nakamura R., Baumjohann W., Zhang T. L., Asano Y., Volwerk M., Vörös Z., Balogh A., Rème H., "Reconstruction of the magnetotail current sheet structure using multi-point Cluster measurements", *Planetary and Space Science*, Volume 53, Issue 1-3, p. 237-243., 2005.
- Saez, F. Zhukov, A.N. Llebaria, A. and Lamy, Ph., (2005), On the 3-D structure of the streamer belt of the solar corona, *Astron. Astrophys.* 442, 351.
- Sahraoui, F., G. Belmont, L. Rezeau, J.L. Pinçon, A. Balogh, N. Cornilleau-Wehrin, (2005), Solar wind-Earth coupling: turbulent fragmentation of magnetic structures seen by Cluster, Submitted to *Nature*.
- Sauer, K., M. Fränz, E. Dubinin, C. Mazelle, A.Korth, H.Rème, I.Dandouras, Upstream gyrating ion events: Cluster observations and simulations, in *The Physics of Collisionless Shocks*, American Institute of Physics, 781, pp. 146-150, Melville, New York, 2005.
- Sauvaud J. A., Moreau T., Maggiolo R., Treilhou J.-P., Jacquy C., Cros A., Coutelier J., Rouzaud J., Penou E., Gangloff M., "High energy electron detection onboard DEMETER: the IDP spectrometer, description and first results on the inner belt", *Planetary and Space Sciences*, in press, 2005.

- Romeuf D., Meunier N., Noens J.-C., Koutchmy S., Jimenez R., Wurmser O., Rochain S., et al., (2005), An automatic recognition for coronagraph Halpha images taken at Pic du Midi during solar cycle 23, soumis a A&A
- Savoini Ph, B. Lembege, V. Krasnoselkikh Et Y. Kuramitsu, (2005), Under and over adiabatic electrons through a perpendicular collisionless shock: theory versus simulations, Annales Geophysicae, soumis.
- Seran, E., and J.-C. Cerisier, (2005), Current layers: Influence of the finite size and non-uniform current distribution, J. Atmos. Solar-Terrest. Phys., 67, 729-737.
- Smets, R., (2005), Hybrid simulation of the Kelvin-Helmholtz Instability: particle dynamics, soumis à Annales Geophysicae.
- Soucek J., V. Krasnoselkikh, T. Dudok De Wit, J. Pickett And C.Kletzing, (2005), Nonlinear decay of foreshock Langmuir waves in the presence of plasma inhomogeneities theory and CLUSTER observations, JGR, 110(8), 8102.
- Spadaro D., R. Ventura, G. Cimino and M. Romoli, (2005), "Streamers and adjacent regions observed by UVCS/SOHO: A comparison between different phases of solar activity", A&A, 430, 701- 712
- Spadaro D., Ventura R., Cimino G. and Romoli M., (2005), "UVCS/SOHO investigation of the interface between streamers and coronal holes", A&A, 429, 353-360
- Stellmacher, G. and Wiehr, E. (2005), Solar Prominences with Na and Mg Emissions and Centrally Reversed Balmer Lines", Astron. Astrophys. 431, 1069-1073
- Stolle C., J. Liliensten, S. Schlüter, H. Lühr, M. Rietveld and Ch. Jacobi, (2005), Observing the north polar ionosphere on October 30, 2003 by GPS imaging and the EISCAT radars, submitted to Annales Geophysicae.
- Thompson S. M., Kivelson M. G., Khurana K. K., McPherron R. L., Weygand J. M., Balogh A., Rème H., Kistler L. M., "Dynamic Harris current sheet thickness from Cluster current density and plasma measurements", J. Geophys. Res., Volume 110, Issue A2, 2005.
- Thuillier, G., J.M. Perrin, C. Lathuillère and F. Huppert, (2005), Dynamics in the Polar Thermosphere after the Coronal Mass Ejection of 20 October 2003 observed with the EPIS Interferometer at Svalbard, J. Geophys. Res., 110(9), 966
- Tjulin, A., J.L. Pinçon, F. Sahraoui, N. Cornilleau-Wehrin, M. Andre, (2005), The k-filtering technique applied to wave electric and magnetic field measurements from the Cluster satellites, Ann. Geophys., soumis
- Vaisberg O. L., Avakov L. A., Smirnov V. N., Sauvaud J. A., Borodkova N. L. , "Accelerated electrons in the LLBL as observed by Interball on February 15, 1996", Planetary and Space Science, Volume 53, Issue 1-3, p. 149-156., 2005
- Vallat, C., Dandouras I., Dunlop M., Balogh A., Lucek E., Parks G.K., Wilber M., Roelof E.C., Chanteur G., and Rème H., First current density measurements in the ring current region using simultaneous multi-spacecraft CLUSTER-FGM data, Annales Geophysicae, Vol. 23, pp 1849-1865, 28-7-2005
- Veselovsky I.S., Koutchmy S. (2005), On the solar white light observations with high space-time resolution from space. JASR (submitted).

Vial, J.C., (2005), « Solar Orbiter : a unique opportunity for investigating the physical processes at work in the magnetic solar atmosphere », *Adv. Space Res.*, sous presse.

Williams, D. R., T. Török, P. Démoulin, L. van Driel-Gesztelyi, B. Kliem, (2005), Eruption of a Kink-unstable Filament in NOAA Active Region 10696, *ApJ* 628, L163-166

Xu, Z., Hénoux, J.-C., Chambe, G., Karlicky, M., Fang, C., (2005), Multi-wavelength Analysis of the Impact Polarization of 2001, June 15th Solar Flare, *ApJ*, 631, 618.

Xu, Z., Hénoux, J.-C., Chambe, G., et al., (2005), Impact Polarization of 2001, June 15th Solar Flare, *Advances in Space Research*, 35(10), 1841.

Yermolaev Yu. I., Yermolaev M. Yu., Zastenker G. N., Zelenyi L. M., Petrukovich A. A., Sauvaud J. A., "Statistical studies of geomagnetic storm dependencies on solar and interplanetary events: a review", *Planetary and Space Science*, Volume 53, Issue 1-3, p. 189-196., 2005

Zong Q.-G., Fritz T. A., Spence H., Zhang H., Huang Z. Y., Pu Z. Y., Glassmeier K.-H., Korth A., Daly P. W., Balogh A., Rème H., "Plasmoid in the high latitude boundary/cusp region observed by Cluster", *Geophys. Res. Lett.*, Volume 32, Issue 1, 2005.

Zouganelis, I., N. Meyer-Vernet, S. Landi, M. Maksimovic, F. Pantellini, (2005), Acceleration of weakly collisional solar-type winds, *The Astrophys. J. Lett.*, 626 :L117-L120.

III. Liste des Revues Invitées et Communications Publiées

Cette liste comporte des revues invitées dans des congrès internationaux et des communications publiées entre 2002 et 2005. Elle a été construite à partir des rapports d'activité des équipes financées par le PNST entre 2002 et 2005.

Cette liste n'est pas exhaustive. Elle n'est pas représentative de l'ensemble de l'activité de la communauté scientifique française exploitant par exemple les données de SOHO ou de CLUSTER (les équipes étant pour la plupart financées par le CNES). De même, elle n'est pas représentative de l'ensemble de l'activité autour du TGE THEMIS .

Cette liste ne comprend pas les revues invitées et les communications liées aux résultats des plasmas purement planétaires ni les revues invitées et les communications liées à la thématique « magnétisme stellaire ».

2002

Revue Invitées et Communications Publiées 2002

Belmont, G., (2002), Particle acceleration mechanisms, "Understanding Solar Activity Phenomena: Progress and Perspectives", Paris-Meudon

Belmont, G., (2002), Plasma and field dynamics: some consequences from in-situ observations in solar wind and magnetospheres, Workshop "Magnetism and Activity of the Sun and Stars", Toulouse

Belmont, G., (2002), Collisionless reconnection: what we learn from magnetospheric in-situ measurements, COSPAR, 34th Scientific Assembly, Houston, Texas

Klein, K.-L., (2002) Solar sources of energetic particles in the interplanetary medium, Second franco-chinese meeting on solar physics, Meudon

Gabriel A H, (2002) "An observer's viewpoint on the determination of core parameters from global helioseismology" in Solar Variability: from core to outer frontiers, European Solar Physics Meeting, Prague

Lefebvre, S., Rozelot, J.P. (2002), The MIRE SOL program as an original contribution of a ground-space synergy program, 10th. European Solar Physics Meeting, (invited) "Solar Variability: From Core to Outer Frontiers", Prague, Czech Republic, ESA-SP 506, p. 955-958.

Lembege B.(2002) Full Particle Electromagnetic Simulations Of Collisionless Shocks (Review) In The Book "Space Plasma Simulation", Ed. Buchner, C.T. Dum And M. Scholer, Springer, p. 54-78

Lembege, B. (2002), Formation Of Energetic Reflected Electrons By A Quasi-Perpendicular Collisionless Shock: Impact Of The Shock Front Turbulence, Workshop On Astrophysical Particle Acceleration In Geospace And Beyond, Chattanooga, USA

Passot, T. (2002), Magnetic pressure and the density field in MHD turbulence with slab geometry, Alfvén 2002 Conference, Pise

Passot, T. (2002), Alfvén wave filamentation, DPP02, American Physical Society meeting, Orlando

Pick, M., (2002), Coronal Mass Ejections from the corona to the interplanetary medium, in Solar-Terrestrial Magnetic Activity and Space environment, Proceedings of the COSPAR colloquium, Beijing, China, Eds by H Wang and R Xu, 14, 149.

Pick M. , D. Maia, S.J. Wang, A. Lecacheux, D. Haggery, S. E. Hawkins, (2002) Solar Origin of energetic particle events Near-relativistic impulsive electron events observed at 1 AU, in Solar variability: from core to outer frontiers. The 10th European Solar Physics Meeting, Prague, Czech Republic. Ed. A. Wilson, ESA SP-506, Vol 1,.

Pick, M., (2002) Solar Radioastronomy at low frequencies, The Universe at Low radio frequencies, Proceedings of IAU symposium, 1999, Pune, India, ed. by A. R. Rao, G. Swarup and Gopal Krishna, 415, 2002.

Régnier, S., Solomon, J., Vial, J.-C., and Mein, P., (2002), MHD waves in active region filament from SOHO-THEMIS joint observations, Proc. of the UAI 188 meeting "Magnetic coupling of the solar atmosphere", Sawaya-Lacoste, H., ed., ESA SP-505, 647

Sauvaud J. A., (2002) Auroral Phenomena and Solar-Terrestrial Relations, invited paper, International Galperin Memorial Conference, Moscow

Sauvaud J. A., H. Reme, J.M. Bosqued, J. Dandouras L .M. Kistler, C. Mouikis, E. Moebius, B. Klecker, et al., (2002) Dynamics of Ionospheric Plasma populations into the plasma sheet: Cluster results, invited paper, COSPAR, Houston

Sauvaud J. A., (2002) The Cluster mission, invited paper, communication à la SF2A, Paris

Sauvaud, J.-A., (2002) Dynamics of Solar and Ionospheric Plasma populations into the plasma sheet: Interball and Cluster results, invited paper, URSI, Maastricht,

Sauvaud, J.-A., (2002) Fast plasma flows in the magnetotail, invited paper, AGU, Washington

Schmieder B., (2002), Prominences and Coronal mass ejections, Meeting on Solar Physics "Solar Researches in the South-Eastern European Countries: Present and Perspectives", ", (G. Maris and M. Masserotti, eds., Observations solaires , 2002, Editura Academiei Romane), page 4.

Schmieder B. and Heinzl P, (2002), Spectral Diagnostics of prominences observed by SOHO and from Ground, Meeting on Solar Physics "Solar Researches in the South-Eastern European Countries: Present and Perspectives", (G. Maris and M. Masserotti, eds., Observations solaires , 2002, Editura Academiei Romane), page 68.

Vakili, F., Chesneau, O., Delplancke, F., Jankov, S., Perraut, K. et al., (2002), in Scientific drivers for ESO future VLT/VLTI instrumentation, Proceedings of the ESO Workshop, p. 303

Vilmer, N., HESSI coordinated data campaigns, Royal Astronomical Society 2002, "HESSI and High Energy Solar Physics", Londres, Mars 2002

2003

Revue Invitées et Communications Publiées 2003

Arnaud, J. (2003), The Determination of the Coronal Magnetic Field, International Workshop "Magnetism and Activity of the Sun and Stars" organized by PNST/PNPS, Toulouse, J. Arnaud and N. Meunier (eds.), EAS Publ. Ser. 9, 209-226

Bommier, V. (2003), The Hanle effect observed in solar prominences: interpretation of the 1974-1982 Pic-du-Midi observations, and new perspectives, International Workshop "Magnetism and Activity of the Sun and Stars" organized by PNST/PNPS, Toulouse, J. Arnaud and N. Meunier (eds.), EAS Publ. Ser. 9, 197-207

Bommier, V., and S. Sahal-Bréchet (2003), Polarized line formation in the presence of a magnetic field and/or a velocity field, Second Franco-Chinese meeting on Solar Physics, "Understanding Active Phenomena Progress and Perspectives", J.C. Héroux, C. Fang and N. Vilmer (eds.), p. 1-13

D'Amicis, R., R. Bruno, M. B. Cattaneo, G. Pallochia, J. A. Sauvaud (2003) Solar Wind Plasma Experiment on Solar Orbiter: dealing with the need for a sufficient phase-space resolution, Solar Wind Ten: Proceedings of the Tenth International Solar Wind Conference. AIP Conference Proceedings, 679, 822-825

D'Amicis, R., R. Bruno, M. B. Cattaneo, B. Bavassano, G. Pallochia, J.-A. Sauvaud (2003), A study on the phase-space resolution for the Solar Wind Plasma Experiment on-board Solar Orbiter, *Memorie della Societa Astronomica Italiana*, 74, p.827

Faurobert, M. (2003), Diagnostics of Solar Magnetic Fields based on the Hanle effect, International Workshop "Magnetism and Activity of the Sun and Stars" organized by t PNST/PNPS, Toulouse, J. Arnaud and N. Meunier (eds.), EAS Publ. Ser. 9, 77-87.

Faurobert, M. (2003), Magnetic Field Diagnostics based on the Hanle Effect, Second Franco-Chinese meeting on Solar Physics, "Understanding Active Phenomena Progress and Perspectives", Meudon (France), J.C. Héroux, C. Fang and N. Vilmer (eds.), p 14-25

Gabriel A H, (2003), Coronal investigations close to the solar limb, ISSS Workshop, l'Aquila

Grappin, R., Léorat, J., Habbal, S.R, (2003), Large-amplitude Alfvén waves in open and closed coronal structures, *Solar Wind Ten*, p. 277

Grappin R., J. Léorat, L. Ofman, Flows in coronal loops driven by Alfvén waves: 1.5 MHD simulations with transparent boundary conditions, CP679, *Solar Wind Ten*, p. 750

Harvey C.C., Keynote paper "Long-Term Benefits of GRID in the Space Domain", atelier SpaceGRID de l'ESA à ESRIN, Frascati

Issautier, K., M. Moncuquet, S. Hoang, (2003) Large-scale structure of the polar solar wind at solar maximum : Ulysses/Urap observations, 10th International Conference on Solar Wind, Ed. M. Velli, AIP Conference Proceedings, 679, 59-62.

Jacquey C., Multi-point substorm observation and theory, Invited paper, EGS - AGU - EUG Joint Assembly, Nice,

Kliem, B., A.L. MacKinnon, G. Trottet, T. Bastian (2003), Recent progress in understanding energy conversion and particle acceleration in the solar corona, In *Energy Conversion and Particle Acceleration in the Solar Corona*, Lecture Notes in Physics, Volume 612, p. 263.

- Le Bouquin, J.B., Rousselet-Perraut, K., Stehlé, C., Lanz, T., Jankov, S., (2003), in Magnetic fields in O, B, A stars: origin and connection to pulsation, rotation, and mass-loss
- Lefebvre, S. and Rozelot, J.P (2003) An original contribution inside the whole PICARD program: the MIRE SOL instrumentation ISCS meeting, Tatraska Lomnica (invited), ESA-SP 535, p. 723-727.
- Lembege, B., (2003), Structure, Formation and Dynamics of Shock Waves, IUGG, Sapporo, Japon.
- Lembege, B.(2003), The Magnetospheric Shock Wave: New Shots Via CLUSTER2 and Numerical Simulations, NASDA Space Agency, Tsukuba, Japon.
- Lembege B. (2003), Physics Of Collisionless Shocks: Basic Mechanisms And Simulations (Tutorial Course) Kyushu University, Fukuoka, Japon.
- Léorat J., F. Rigaud, R. Vitry and G. Herpe, (2003), Dissipation in a flow driven by turbulence and application to the design of an MHD wind tunnel, in Proceedings of the fifth international Pamir Conference, Ramatuelle, 2002, Magnetohydrodynamics, Vol.39, 321
- Lilensten J., COST 724 on Space Weather: at the edge of its start, conférence invitée, Agence Spatiale Européenne, novembre 2003
- Lopez Ariste, A, Tomczyk, S, Semel, M, & Darnell, A. (2003), Polarimeter for the study of magnetic fields in prominences in Innovative Telescopes and Instrumentation for Solar Astrophysics. Ed. S L. Keil, S V. Avakyan . Proceedings of the SPIE, Volume 4853, pp. 235-239
- Passot, T., (2003), A three-dimensional Kinetic Derivative Nonlinear Schrödinger Equation for Alfvén wave trains, Fifth International Workshop on Nonlinear Waves and Chaos in Space Plasmas, Mumbai, Inde.
- Passot, T., (2003), Alfvén wave dynamics, Cours invité au Abdus Salam International Center for Theoretical Physics, Trieste, Italie.
- Pinçon, J.L., F. Sahraoui, G. Belmont, L. Rezeau, (2003), K-Filtering technique applied to ULF wave identification in the magnetosheath, STAMMS conference, Cluster input to critical issues in Magnetospheric physics, Orléans
- Rousselet-Perraut, K., Stehlé, C., Le Bouquin, J.B., Jankov, S., Vakili, F., (2003), in "Magnetism and activity of the Sun and stars", Arnaud, J., Meunier, N. (eds), Vol. 9, p. 123
- Sauer, K., E. Dubinin, and C. Mazelle, (2003), Stationary Nonlinear LF Electromagnetic Waves in A Beam-Plasma: Application to Upstream Phenomena At Earth And Mars, IUGG / IAGA 2003, Sapporo, Japon..
- Sauvaud J-A, (2003) A study of the dynamics of ionospheric ions in the Earth's magnetotail, invited paper, IAGA, Sapporo
- Sauvaud, J.-A., The puzzling magnetotail, invited paper, Spatio-Temporal Analysis and Multipoint Measurements in Space (STAMMS), Orléans
- Sauvaud, J.-A. and P. Décréau, Multi-Instrument Evidence of Thermal Plasma of Ionospheric Origin up to the Dayside Magnetosphere, The Dayside Magnetosphere and Cusp, invited paper, Yosemite Conference-Workshop
- Schmieder B. (2003), Environment of Prominences and EUV filaments, Second French-Chinese Meeting on Solar Physics, "Understanding active phenomena"(eds. Hénoux H., Fang C., Vilmer), p 127

Schmieder B. and Basu S. (2003), Climate and Space Weather program
2003, ESA, SP-535, Slovakia, ISCS3, 701

Stenuit, H., M. Fujimoto, S. A. Fuselier, J.-A. Sauvaud, and the BTL Team, Multi-spacecraft study on the dynamics of the flank magnetosphere under northward IMF, invited paper, EGS-AGU, Nice

Sulem, P.L. (2003), Alfvén wave collapse in dispersive MHD: direct numerical simulations and asymptotic modelling, Emerging applications of the nonlinear Schrödinger equation, University of California, Los Angeles.

Sulem, P.L. (2003), Alfvén wave filamentation: Long wave asymptotics and Landau-fluid description of collisionless plasmas, Second Annual IGPP Astrophysical Conference: Waves and Turbulence in the Interplanetary and Interstellar Space: Theory, Observations and Ramifications, Palm Springs, Californie.

Van Driel-Gesztelyi L., Mandrini, C.H., Démoulin P. (2003), Emergence and long-term evolution of an active region, Second French-Chinese Meeting on Solar Physics, "Understanding active phenomena" (eds. Hénoux H., Fang C., Vilmer), p 57

Vilmer, N., R.P. Lin, RHESSI Team, (2003), Characteristics of High Energy Particles deduced from HXR/GR imaging spectroscopy with RHESSI, Second franco-chinese meeting on solar physics, "Understanding active phenomena: Progress and Perspectives", (eds. Hénoux H., Fang C., Vilmer), p. 222

Vilmer, N., R.P. Lin, RHESSI Team, First RHESSI results, Particle Acceleration in Astrophysical Objects, Cracovie, Juin 2003

Vilmer, N., A.L. MacKinnon, (2003), What can be learnt about particle acceleration models from multiwavelengths observations? In Energy Conversion and Particle Acceleration in the Solar Corona, Lecture Notes in Physics, Volume 612, p. 126

Zouganelis, I., M. Maksimovic, N. Meyer-Vernet, V. Pierrard and H. Lamy (2003) A new exospheric model of the solar wind acceleration: the transonic solutions, Solar Wind 10 proceedings, AIP CP 679, 315

2004

Revue Invitées et Communications Publiées 2004

Archer, M., T.S. Horbury, E.A. Lucek, C. Mazelle, A. Balogh, and J. Dandouras, (2004) Size and shape of ULF waves in the terrestrial foreshock, , Proceedings of VIth Workshop on Collisionless Shocks, pp. 139-149, Paris

Belmont, G., F. Sahraoui, L. Rezeau, (2004), Nature and Role of the Magnetosheath Turbulence: Observations and Theory, COSPAR Colloquium, Dynamical Processes in Critical Regions of the heliosphere, Ben Gurion University, Israel

Belmont, G., F. Sahraoui, L. Rezeau, (2004), Weak turbulence in Hall-MHD: Toward a Theory, Alfvén 2004 Workshop on Space Environment Turbulence, Beaulieu

Belmont, G., (2004), Reconnection induced by small scale perturbations, EGU, 1st General Assembly, Nice

Belmont, G., F. Sahraoui, L. Rezeau, (2004), Measuring and understanding space turbulence, COSPAR, 35th Scientific Assembly, Paris

Dandouras J., H. Rème, C. Vallat, G. K. Parks, J. Cao, C. Carr (2004), Double Star and Cluster observations of a plasma sheet thinning event, on September 14, 2004, Communication invitée au "2nd DSP Cluster Workshop", Pekin

Dandouras J., V. Pierrard, J. Goldstein, C. Vallat, G. K. Parks, C. Guillard, F. Sevestre, H. Rème (2004) Multipoint observations of ionic structures in the Plasmasphere by CLUSTER - CIS and comparisons with IMAGE-EUV observations and with Model Simulations, Communication invitée au "Inner Magnetosphere Interactions Workshop", Yosemite, USA

Dauphin C., N. Vilmer, A. Anastasiadis, (2004) Particle Acceleration in a Complex Active Region Modelled by a Cellular Automata, Colloque SF2A, EDP Sciences, pp. 111-112.

Gabriel A H, (2004), Outflow velocities in the onset region of the fast solar wind, AOGS Singapore

Harvey C.C., GRID – A Space Plasma Physics Perspective, Papier invité à l'école thématique DRUIDE-2004 "DistRibUtlon de Données à grande Echelle", Le Croisic

Harvey C.C., J. Thieman, T. King, D. Aaron Roberts, SPASE – Space Physics Archive Search and Extract, Paper invité au Colloque PV-2004, "Ensuring the Long Term Preservation and Adding Value to Scientific and Technical Data", ESA/ESRIN, Frascati, ESA WPP-232

Klein, K.-L., (2004), Radio diagnostics of energetic electrons, 35th COSPAR Paris

Klein, K.-L., (2004) Radio emission and solar energetic particle events, Chapman Conf. on solar energetic particles and plasmas, Turku

Koutchmy, S. (2004), Coronal structures and Dynamics, invited review IAU Symp. 223, Saint-Petersbourg, in "Multi-Wavelength Investigations of the Solar Activity", Proceedings IAUS 223 (2004), Stepanov et al. ed., 509-516

Lembege B., J. Giacalone J., M. Scholer, T. Hada, M. Hoshino, V. Krasnoselskikh, H. Kucharek, P. Savoini And T. Terasawa. (2004), Selected Problems In Collisionless Shocks Physics (Review), Space Science Rev., 110, 161-226

- Lembege, B., (2004), The Electron Physics Of Collisionless Shocks, Cospar Colloquium on Dynamical Problems in Critical Regions of the Heliosphere, Tel-Aviv, Israel
- Lembege B. (2004), Small and large scale nonstationarity of the collisionless shock front: recent results, Alfvén 2004 Workshop On Space Environment Turbulence, Beaulieu
- Lembege, B. (2004), Numerical Simulations Of Collisionless Shocks ; Part 1: Macroscopic Effects, Tutorial Course, INPE (Brazilian Space Agency), San Jose Dos Campos, Brazil
- Lembege, B. (2004), Numerical Simulations Of Collisionless Shocks; Part 2: Microscopic Effects, Tutorial Course, INPE (Brazilian Space Agency), San Jose Dos Campos, Brazil
- Lembege, B.(2004), Numerical Simulations Of Collisionless Shocks; Applications To The Earth's Bow Shock, INPE (Brazilian Space Agency), San Jose Dos Campos, Brazil
- Louarn P., Generation of the auroral kilometric radiation in density cavities (invited paper), High frequency phenomena in geospace, Ringberg
- Mandrini C.H., Démoulin P., van Driel-Gesztelyi L., Green L.M., López Fuentes M., (2004), Magnetic helicity budget of solar-active regions from the photosphere to magnetic clouds, *Astrophysics and Space Science*, 290, 319
- Mazelle C., (2004), Nonlinear Waves Observed By Mars Global Surveyor, Third ISSI Workshop On Nonlinear Waves, Bern, Suisse
- Mazelle C., (2004), Coherent Low Frequency Waves And Gyrating Ions Upstream From The Terrestrial And Martian Bow Shocks: Observations And Theory, Alfvén 2004 International Workshop, Beaulieu.
- Mazelle C., Bertucci, C., Sauer, K., Dubinin, E., And Acuna, M.H., (2004), On the properties of coherent waves at the proton cyclotron frequency at Mars", EGU 1st General Assembly, Nice
- Mazelle, C., K. Meziane, M. Wilber, D. Le Quéau, J.P. Eastwood, G. Parks (2004), Characteristics of field-aligned and gyrophase-bunched ion beams in the foreshock, *Proceedings of VIth Workshop on Collisionless Shocks*, pp. 79-97, Paris
- Passot, T., (2004), Fluid description for dispersive MHD waves in a collisionless plasma, European Geosciences Union 1st General Assembly, Nice.
- Passot, T., (2004) Fluid description of dispersive MHD waves in a warm collisionless plasma, *Dusty and Space Plasma Physics Workshop*, Ghent
- Passot, T. (2004), A Landau fluid model for dispersive magnetohydrodynamics, *Magnetic Fields in the Universe*, Angra dos Reis, Brésil
- Pick, M., (2004) Overview of Solar Radio Physics and Interplanetary Disturbances, Chapter 2, 17-45, 314, *Astrophysics and Space Science Library*, Eds D. Gary et C. U. Keller., Kluwer Academic Publishers
- Pottelette, R., (2004), Small scale acceleration processes generated in the auroral region: Remote sensing and in situ measurements, *Wiser Alfvén 2004 Workshop*, Beaulieu
- Pottelette, R., (2004), Evidence for particles acceleration by localized nonlinear structures in the upward current region", EGU European General Assembly, Nice
- Pottelette, R.,(2004), In situ and remote sensing measurements of acceleration processes in the upward current region: FAST observations, *Ringberg Workshop: Waves and Radiation in Geospace*, Ringberg Castle

Rezeau, L., F. Sahraoui, G. Belmont and the Cluster turbulence team, (2004) Analysis of the Magnetosheath Turbulence by Cluster II Measurements, Alfvén 2004 Workshop on Space Environment Turbulence, Beaulieu, France

Sauvaud, J.-A. (2004) Probing the magnetotail state and topology from dispersed ion structures related to the poleward boundary of the auroral zone, AOGS, 1th Annual Meeting, invited paper, Singapore

Sauvaud, J.-A. (2004) Structuring of space plasma, invited paper, COSPAR, Paris

Schmieder B. and van Driel L., (2004), Source Regions of Coronal Mass ejections IAU 226 colloquium, Beijing 2004, in press

Schwartz S., S. Bale, M. Balikhin, A. Balogh, D. Burgess, T.Horbury, V. Krasnoselskikh, H. Kucharek, E. Lucek, B.Lembege, E. Mobius, M. Scholer, M. Thomsen, S. Walker (2004) Cluster at the Bow Shock, "Sun-Earth Connection" Conference Merida, Yucatan, Mexico

Sulem P.L., T. Passot, A. Chain, J. Buchner, (2004), Advances in space environment turbulence, Nonlinear Processes in Geophysics, Special issue 11, 5/6

Vilmer, N., Energy release and particle acceleration in impulsive solar flares, (2004), VII Colage: 7th Latin-American Conference on Space Geophysics, 2004

Wilber, M., K. Meziane, C. Mazelle, G. Parks, (2004), Characterization of Field-Aligned Dependency on θ_{Bn} : Initial Results, Proceedings of Vth Workshop on Collisionless Shocks, pp. 99-106, Paris

2005

Revue Invitées et Communications Publiées 2005

- Bely-Dubau F, (2005), Outflow in the onset region of the fast solar wind, AOGS Singapore
- Bertaux, J.L., Lallement, R., Quemerais, E., Ferron, S., Koutroumpa, D., Kyrola, E (2005) Solar wind latitudinal anisotropies: a new analysis of SWAN results: Solar Wind 11, in press.
- Belmont, G., F. Sahraoui, L. Rezeau, J-L. Pincon, N. Cornilleau Wehrin, A. Balogh, (2005) Cluster observation of mirror turbulence at the magnetopause: constraints for kinetic modelling, URSI General Assembly, New-Delhi,
- Bugnon, G., R. Goswami, T. Passot, P.L. Sulem (2004), Towards fluid simulations of dispersive MHD waves in a warm collisionless plasma, *Advances in Space Research*, Elsevier, sous presse.
- Dandouras J., (2005), DSP / CLUSTER magnetotail observations, Communication invitée au "Asia Oceania Geosciences Society's 2nd Annual Meeting", Singapour
- Démoulin P., (2005), The long-term evolution of active regions - multi-wavelength flux and heating study: Observations and theory, IAU Symposium 223 "Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity", Eds.: A.V. Stepanov, E.E. Benevolenskaya, A.G. Kosovichev., p. 13
- Eastwood, J E. A. Lucek, C. Mazelle, K. Meziane, Y. Narita, J. Pickett, and R. Treumann, (2005), in *Dayside Magnetospheric Boundaries: Cluster Results, Part I, Chapter 2 "The Foreshock"*, G. Paschmann, C. P. Escoubet, S. J. Schwartz, and S. E. Haaland (Eds.), Space Science Series of ISSI, Kluwer Academic Publisher, in press, 2005.
- Grigorenko E., Fedorov A., Kovrazhkin A., Sauvaud J. A., Zelenyi (2005) Small-scale spatial and/or temporal structures accelerated at separatrix layers between open and closed magnetotail field lines, invited paper, European Geosciences Union, General assembly, Vienna
- Lembege, B., (2005), *Physics of Collisionless Shocks: Sources of The Shock Front Nonstationarities from Micro to Macro Scales*, Spring URSI Meeting, Boulder, Colorado, USA,.
- Lembege B., (2005), *Physics of Collisionless Shocks : from macro to micro scales Nonstationary Processes*, WISER Meeting, Leuven, Belgique
- Llebaria A, (2005), Properties of polar plumes from white-light observations with the SOHO LASCO-C2 coronagraph, AOGS Singapore
- Louarn P., (2005) On the activity of thin current sheets (Invited paper), Colloque of the 'World Space Foundation', Graz
- Louarn P., (2005), Generation of the auroral kilometric radiation in density cavity, in *Geospace and plasma high frequency waves*, Springer, ed. J. Labelle and R. Treuman
- Mazelle C. (2005) Ion beams in the foreshock, Fourth annual IGPP international astrophysics conference on the physics of collisionless shocks, Palm Springs, California.
- Mazelle C. (2005) Field-Aligned and Gyration Ion Beams at the Edge of the Earth's Ion Foreshock: Recent CLUSTER Data, ISSS-7, Kyoto University.
- Mazelle, C.(2005), *Nonlinear LF Wave-Particle Interaction in a Planetary Foreshock* Asia Oceania Geoscience Society 2nd Annual Meeting, Singapore.

- Meziane, K. (2005), Upstream Ions ; What Is New ?, Fourth Annual IGPP Astrophysics International Conference on the physics of Collisionless Shocks, Palm Springs, California
- Meziane, K., C. Mazelle et al., (2005), Upstream Ions: New Results From Cluster, IAGA, GAIV.03, Toulouse.
- Meziane, K.; Mazelle, C.; Wilber, M.; Parks, G. K. (2005), Field-aligned beams upstream of the earth's bow shock: current observational knowledge and unresolved issues, EGU 2005, Vienna.
- Parenti, S., E. Buchlin, J.-C. Vial, S. Galtier, (2005) Modelling the radiative signature of turbulent heating in coronal loops, Proceedings of the SOHO 15 workshop 'Coronal Heating', ESA SP-575, p. 497
- Parks, G, Wilber, M, Lee, E, Dandouras, I, Mazelle, C , Reme, H; Sauvaud, J, Goldstein, M; Keith, W; Fazarkeley, A and CIS Team (2005), First clear particle observations of Earth's bow shock potential, EGU 2005, Vienna.
- Passot, T., (2005), Alfvén wave instabilities in collisionless plasmas: generation of coherent structures and turbulence, European Geosciences Union 1st General Assembly, Vienne
- Passot, T., (2005), From kinetic to fluid descriptions of plasmas, Short course and workshop on kinetic theory , Fields Institute Communications 46 : Topics in Kinetic Theory, eds. T. Passot, C. Sulem and P.-L. Sulem, American Mathematical Society, sous presse.
- Passot, T. and P.L. Sulem, (2005), Landau fluid model for weakly nonlinear dispersive magnetohydrodynamics, "Magnetic Fields in the Universe: from Laboratory and Stars to Primordial Structures", eds. E. M. de Gouveia Dal Pino, A. Lazarian and G. Lugones
- Rème H., J. Dandouras (2005) The HIA instrument onboard the Chinese TC-1 Double Star spacecraft and its first results in conjunction with the Cluster spacecraft, Communication invitée à l'EGU, Vienne
- Sauer, K.; Dubinin, E.; Fraenz, M.; Mazelle, Ch.; Mckenzie, J.F (2005), Solitary electromagnetic waves in an ion beam-plasmas: Application to CLUSTER Foreshock Observations. EGU 2005, Vienna.
- Sauer, K.; Fraenz, M.; Dubinin, E.; Mazelle, C.; Rème., H.; Dandouras, I. (2005) Upstream Gyration Ion Events: Cluster Observations and Simulations, Fourth Annual IGPP Astrophysics International Conference, on the Physics of Collisionless Shocks, Palm Springs, California
- Sauvaud J. A., (2005) Ion dispersion structures, invited paper, Cluster and Double Star Symposium, 5th anniversary of Cluster in Space, ESA/ESTEC
- Sauvaud J. A. (2005) Magnetospheric Ions of solar Origin, invited paper, Solar Dynamics and its effects on the Heliosphere and Earth, ISSI workshop.
- Savoini P. and B. Lembège, (2005), Two dimensional simulations of a curved shock: Self consistent formation of the electron foreshock, EGU 2nd General Assembly, Vienne, Autriche.
- Schmieder B., (2005), Magnetic source regions and CMEs, International Meeting in Nainital, India, March 2005, JAP, in press
- Sulem C., T. Passot, P.L. Sulem (2005), Topics in Kinetic Theory Fields Institute Communications, 46, sous presse.

Sulem P.L., (2005), Introduction to the guiding center theory, Proceedings of the Short Course and Workshop on Kinetic Theory (Toronto 2004) , Fields Institute Communications 46 : Topics in Kinetic Theory, eds. T. Passot, C. Sulem and P.-L. Sulem, American Mathematical Society, sous presse.

Vilinga, J., and Koutchmy, S. (2005) The chromospheric prolateness and its variations, in ASP Conf. Series, NSO-SPO 22d International Workshop, in press