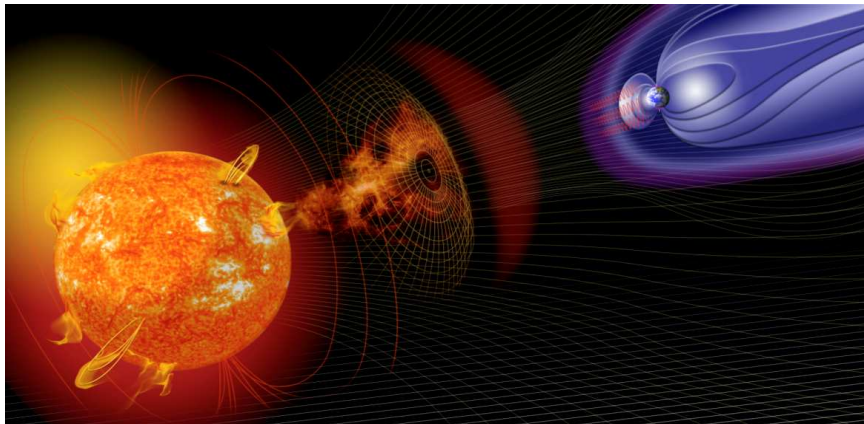


**Programme National  
Soleil – Terre  
(PNST)**

**2010-2013**

**Bilan & Perspectives**



# PLAN

## 1. INTRODUCTION

- 1.1 Questions-Clés
- 1.2 Faits saillants de la période 2010-2013

## 2. BILAN ET PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

- 2.1 Couplage entre les différentes enveloppes de plasma
  - 2.1.1. *Contexte*
  - 2.1.2. *Résultats marquants*
- 2.2 Transport d'énergie multi-échelles et turbulence
  - 2.2.1. *Contexte*
  - 2.2.2. *Résultats marquants*
- 2.3 Mécanismes d'accélération et de chauffage du plasma
  - 2.3.1. *Contexte*
  - 2.3.2. *Résultats marquants*
- 2.4 Activité éruptive ou impulsive dans les plasmas
  - 2.4.1. *Contexte*
  - 2.4.2. *Résultats marquants*
- 2.5 Météorologie de l'espace
  - 2.5.1. *Avancées dans la compréhension des phénomènes physiques*
  - 2.5.2. *Avancées dans les applications en météorologie de l'espace*
- 2.6 Perspectives
  - 2.6.1. *Couplage entre les différentes enveloppes de plasma*
  - 2.6.2. *Transport d'énergie multi-échelles et turbulence*
  - 2.6.3. *Mécanismes d'accélération et de chauffage du plasma*
  - 2.6.4. *Activité éruptive ou impulsive dans les plasmas*
  - 2.6.5. *Météorologie de l'espace*

## 3. INTERFACES AVEC LES AUTRES PROGRAMMES

- 3.1 Interface avec le PNP
  - 3.1.1 *Quelques thèmes récurrents*
  - 3.1.2 *Perspectives*
- 3.2 Interface avec le PNPS
  - 3.2.1 *Quelques faits marquants*
  - 3.2.2 *Quelques thèmes récurrents*
  - 3.2.3 *Perspectives*

## 4. MOYENS, SERVICES ET OUTILS

- 4.1 Instrumentation au sol
  - 4.1.1 *THEMIS*
  - 4.1.2 *SuperDARN*
  - 4.1.3 *EISCAT*

- 4.1.4 *European Solar Telescope (EST)*
- 4.1.5 *Radio-héliographe et spectrographes de Nançay*
- 4.1.6 *PICARD-sol*
- 4.2. Instrumentation spatiale
  - 4.2.1 *Solar Orbiter et Solar Probe Plus*
  - 4.2.2 *Bepi Colombo*
  - 4.2.3 *MAVEN*
  - 4.2.4 *SWARM*
  - 4.2.5 *Taranis*
  - 4.2.6 *Autres missions*
  - 4.2.7 *Compétences instrumentales*
- 4.3. Bases et services de données
  - 4.3.1 *CDPP*
  - 4.3.2 *MEDOC*
  - 4.3.3 *BASS2000*
  - 4.3.4 *CERCLe*
  - 4.3.5 *SIIG*
  - 4.3.6 *IPODE*
  - 4.3.7 *APIS*
- 4.4 Outils numériques
  - 4.4.1 *Modélisation et simulations numériques*
  - 4.4.2. *Codes d'inversion de raies permettant l'interprétation des données*
  - 4.4.3. *Simulations « data driven » et assimilation de données*

## **5. BILAN ADMINISTRATIF ET FINANCIER**

- 5.1 Structure et fonctionnement
- 5.2 Budget
- 5.3 Ressources humaines
- 5.4 Bibliographie

## **6. CONCLUSIONS**

## **ANNEXE A : PROJETS FINANCES**

## **ANNEXE B : AUTRES PROJETS (ANR, FP7)**

## 1. INTRODUCTION

Créé en 1998, le Programme National Soleil-Terre (PNST) est un programme de la division Astronomie-Astrophysique de l'INSU dédié à l'étude de l'atmosphère solaire, des relations Soleil-Terre, de l'environnement ionisé de la Terre et, par extension, des magnétosphères planétaires. Les thèmes scientifiques du PNST vont principalement du magnétisme et de l'activité solaires jusqu'à la dynamique de la magnétosphère et de l'ionosphère terrestres en passant par le milieu interplanétaire. Le système Soleil-Terre est un « objet » astrophysique proche pour lequel nous disposons de mesures *in situ* ainsi que de possibilités d'observations à haute résolution spatiale et temporelle, ce qui constitue un cas unique en astrophysique. Les mécanismes physiques ainsi analysés contribuent à un corpus théorique fondamental pour étudier d'autres environnements ionisés, et l'héliosphère est en quelque sorte un laboratoire « grandeur nature » pour l'astrophysique.

Ce rapport présente les activités de la communauté PNST au cours de la période 2010-2013. Fin 2013, cette communauté rassemblait 241 chercheurs dont 123 permanents, 35 émérites et 83 doctorants et post-doctorants, regroupés dans 15 laboratoires, à savoir : **CEA** (Saclay et Bruyères), **IAP** (Paris), **IAS** (Orsay), **IPAG** (ex-LPG, Grenoble), **IPG** (Paris), **IRAP** (issu de la fusion en 2011 du CESR et du LATT, Toulouse), **LAGRANGE** (issu de la fusion en 2011 de CASSIOPEE et FIZEAU, Nice), **LAM** (Marseille), **LATMOS** (Guyancourt), **LESIA** (Meudon), **LPC2E** (Orléans), **LPP** (Palaiseau), **LUTH** (Meudon), **ONERA** (Toulouse) et **THEMIS** (Tenerife).

### 1.1. Questions-Clés

Les grandes questions au cœur des activités du PNST sont les suivantes :

*☞ Quels sont les mécanismes qui assurent les couplages entre les différentes enveloppes de plasma ?*

Les interfaces entre les différentes enveloppes de plasma sont des lieux privilégiés où se produisent des transferts de masse et d'énergie. Parmi ces transferts, on peut citer par exemple l'émergence du champ magnétique issu de l'intérieur du Soleil dans l'atmosphère solaire, le couplage magnétique entre photosphère et chromosphère solaires, la pénétration de particules du vent solaire dans la magnétosphère terrestre, ou encore la fermeture des courants de la magnétosphère dans l'ionosphère terrestre. A ceci s'ajoute le rôle des transferts d'énergie impulsifs dans l'interaction ionosphère-atmosphère.

*☞ Quel est le rôle de la turbulence dans les plasmas spatiaux et comment l'énergie injectée est-elle transférée aux différentes échelles ?*

La question porte ici sur le rôle de la turbulence dans le transport multi-échelles de la matière et de l'énergie dans le vent solaire. Quel est le rôle de la turbulence dans la cascade des grandes échelles vers les petites ? Quel rôle joue l'anisotropie du champ magnétique dans la turbulence plasma ou comment la turbulence conduit-elle à la formation de

structures cohérentes ? Ici, la détermination des échelles caractéristiques est un point particulièrement important car les observations révèlent que la cascade turbulente peut se prolonger jusqu'aux échelles électroniques.

☞ Quels sont les mécanismes impliqués dans le chauffage et l'accélération des particules ?

Les processus d'accélération et le chauffage sont omniprésents dans l'héliosphère, depuis la couronne solaire ou le vent solaire jusqu'aux régions aurorales de la Terre ou la magnétosphère interne (particulièrement en période de sous-orages). Les mécanismes en jeu restent mal compris. Parmi ces processus, on peut citer : (i) la formation de la chromosphère du Soleil et de sa couronne chaude, (ii) l'accélération des particules dans les éruptions solaires, (iii) la partition de l'énergie incidente par les chocs, ou encore (iv) la formation des fines couches de courant et leur dynamique.

☞ Quels sont les processus responsables de phénomènes éruptifs ou impulsifs ?

Les processus responsables d'une activité éruptive ou impulsive dans les plasmas héliosphériques se produisent sur de petites échelles spatio-temporelles. Ils sont donc difficilement observables. Par contre, leurs effets sont clairement identifiables car ils bouleversent l'environnement à grande distance, qu'il s'agisse par exemple d'éjections de masse coronale (CME), de pénétration impulsive de plasma dans la magnétosphère lors d'événements de transfert de flux (FTE), ou du déclenchement des sous-orages. Les questions qui se posent portent par exemple sur (i) l'origine des champs magnétiques non-potentiels, (ii) le déclenchement du processus de reconnexion magnétique ou (iii) l'évolution de la topologie magnétique lors de cette reconnexion.

☞ La météorologie de l'espace, ou comment caractériser la réponse du système magnétosphère-ionosphère-thermosphère terrestre à l'activité du Soleil ?

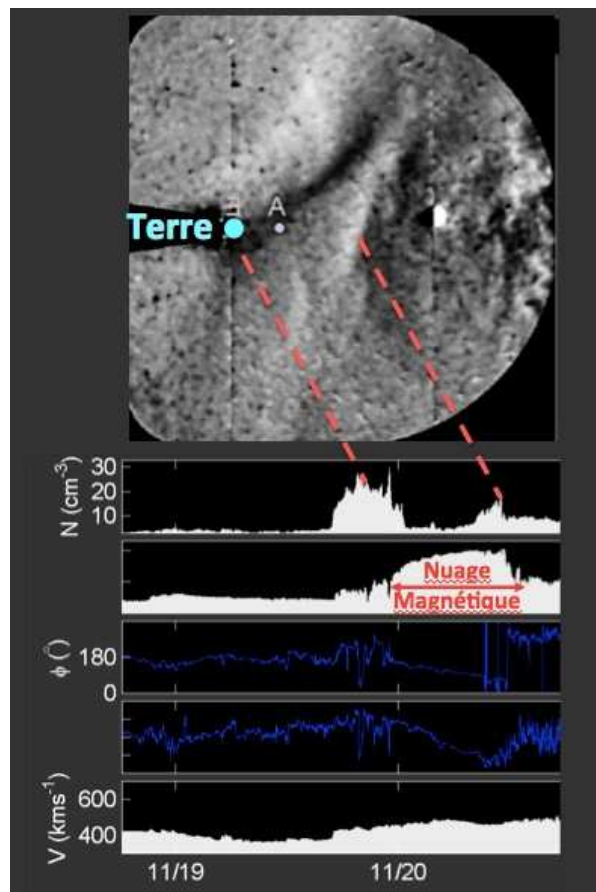
Il s'agit ici d'une part de mieux caractériser la propagation des perturbations d'origine solaire dans l'héliosphère, et d'autre part d'évaluer leur impact sur l'environnement terrestre. Quels sont par exemple les liens entre la variabilité solaire et les caractéristiques de l'atmosphère terrestre ? Comment caractériser et prédire la variabilité solaire dans les rayonnements ionisants (XUV/UV) ? Comment la variabilité de l'irradiance totale contribue-t-elle au forçage climatique ? Quelles sont les observables disponibles et quels sont les meilleurs proxys ?

**Au sein du PNST, les grandes questions mentionnées ci-dessus sont abordées d'une part à l'aide de moyens d'observation au sol et dans l'espace, d'autre part à l'aide de travaux théoriques, de modélisation ou de simulations numériques principalement centrés sur la physique des plasmas et qui font le lien entre observations et processus physiques.**

## 1.2. Faits Saillants de la Période 2010-2013

### ☞ Premières observations de la propagation d'une CME à l'aide de STEREO

Avec les satellites STEREO (lancé fin 2006) et SDO (Solar Dynamics Observatory ; lancé début 2010), une nouvelle ère s'est ouverte où sont disponibles simultanément des observations *in situ* multi-points des éjections de matière provenant du Soleil (« Coronal Mass Ejection » ou CME) et des images haute résolution de la couronne et du milieu interplanétaire. C'est ainsi qu'il a été possible de suivre pour la première fois de façon continue la propagation d'une CME en analysant les zones d'augmentation de densité électronique observée dans ces nouvelles images. Ceci est illustré dans la figure 1.2.1.

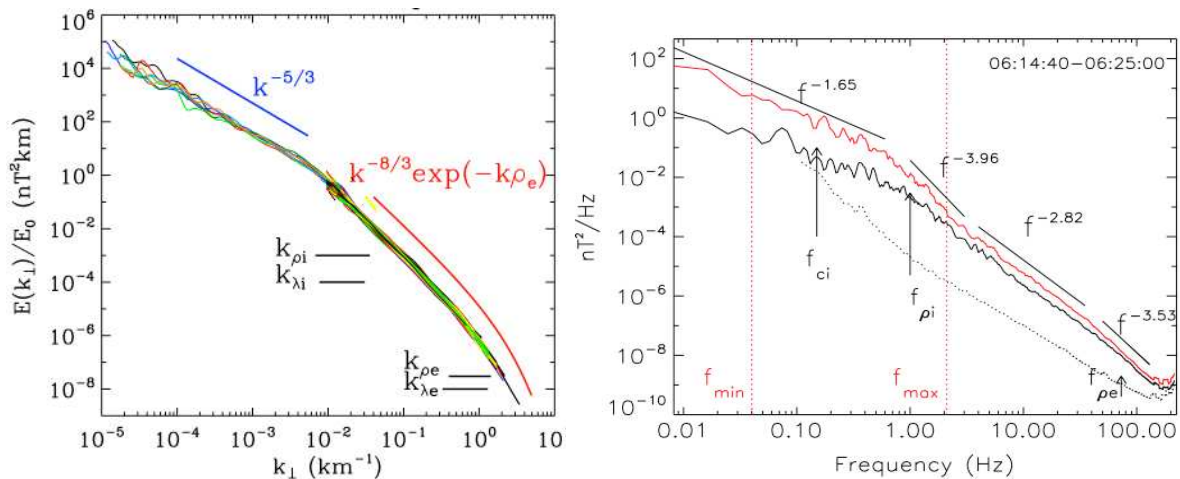


**Figure 1.2.1 :** (Haut) Une image du vent solaire obtenue par STEREO-A et qui montre deux fronts de haute densité électronique percutant l'environnement terrestre. (Bas) Les mesures *in situ* du plasma obtenues simultanément à la Terre révèlent que ces deux fronts sont séparés par un champ magnétique très intense et torsadé appelé nuage magnétique (Rouillard *et al.*, 2010 ; Lavraud, 2013).

Ces observations ont confirmé que les éjections de matière provenant du Soleil sont structurées par un champ magnétique torsadé très intense. Elles ont aussi mis en évidence une évolution dynamique complexe (interactions, rotations, déflexions, reconnections) de ces structures au cours de leur propagation entre le Soleil et la Terre. Ces observations permettront à terme de mieux prévoir les propriétés du champ magnétique à l'intérieur des CMEs (voir par exemple mission INSTANT proposée dans le cadre de la prospective CNES), élément important pour la météorologie de l'espace.

☞ Sur la nature de la turbulence et de la dissipation dans le vent solaire

La nature de la turbulence et l'origine de sa dissipation dans les plasmas peu collisionnels comme le vent solaire, sont aujourd'hui au cœur des questions posées en physique des plasmas spatiaux. En particulier, la dissipation des fluctuations magnétiques est un des mécanismes pouvant expliquer le chauffage du vent solaire. Comme l'ont montré les observations, cette dissipation semble se produire aux échelles cinétiques du plasma, à savoir : les échelles (rayon de Larmor ou longueur d'inertie) ionique ( $\sim 100$  km) et électronique ( $\sim 1$  km). L'instrument STAFF à bord de CLUSTER a permis de résoudre pour la première fois les fluctuations magnétiques turbulentes aux échelles électroniques du plasma (Sahraoui et al., 2010 ; Alexandrova et al., 2012). Un nouveau régime de turbulence cinétique a été mis en évidence qui permet de transférer l'énergie des échelles ioniques jusqu'à l'échelle de gyration des électrons où les processus de dissipation deviennent dominants. Les études statistiques de cette turbulence, menées à l'aide de ces données, révèlent l'existence de deux types de lois d'échelles - loi de puissance et loi exponentielle - comme cela est illustré dans la figure 1.2.2. Ces travaux observationnels ont stimulé de nombreux travaux théoriques et numériques qui visent à mieux comprendre ce nouveau régime de turbulence.



**Figure 1.2.2 :** Spectres des fluctuations magnétiques mesurés à l'aide de l'expérience STAFF à bord de CLUSTER qui mettent en évidence pour la première fois la cascade de l'énergie magnétique des échelles MHD ( $\sim 10^5$  km) jusqu'aux échelles électroniques ( $\sim 1$  km) avec deux lois d'échelle possible, à savoir : loi de puissance et loi exponentielle (tirée de Sahraoui et al. (2010) à droite et de Alexandrova et al. (2012) à gauche).

Par ailleurs, des simulations numériques directes 3D ont permis de mettre en évidence un nouveau régime de turbulence au-delà des échelles de la MHD (généralement utilisée pour décrire le vent solaire aux grandes échelles). Ces travaux indiquent une transition d'un régime de turbulence MHD à d'autres régimes turbulents de type électron MHD ou ion MHD, caractérisés par des lois spectrales différentes (respectivement en  $k^{-7/3}$  et en  $k^{-11/3}$ ) et des fluctuations de polarités (droite ou gauche) différentes (*Meyrand et al.*, 2012). La description des petites échelles nécessite d'inclure des aspects plus réalistes de la turbulence tels que la compression du plasma et les effets cinétiques. Ces effets peuvent être pris en compte dans les codes Landau-fluide (*Passot et al.*, 2014), hybride ou PIC (*Aunai et al.*, 2013). Enfin, ces travaux observationnels ont révélé les limites des données actuelles et la nécessité de développer une instrumentation appropriée (meilleure sensibilité, haute résolution temporelle et spatiale) pour les futures missions dédiées à ce problème.



## 2. BILAN ET PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

Ce chapitre présente un bilan large mais non exhaustif des résultats scientifiques obtenus sur la période 2010-2013, ainsi que les perspectives à court et moyen termes.

### 2.1. Couplage entre les différentes enveloppes de plasma

#### 2.1.1. Contexte

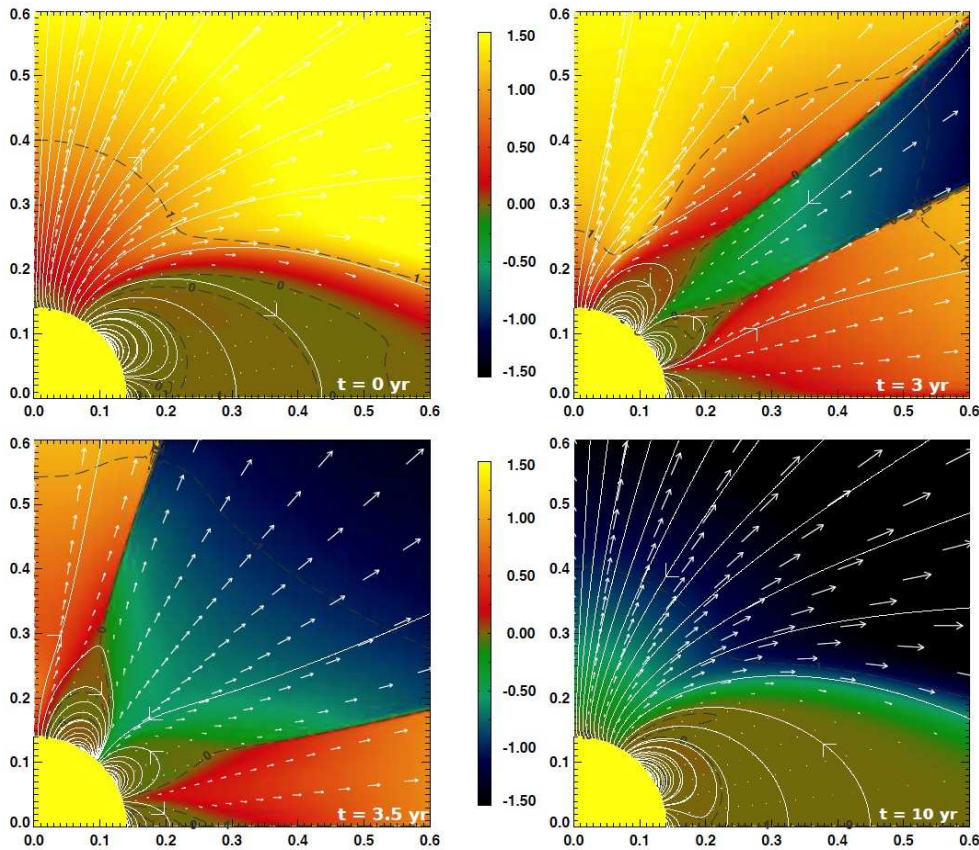
Il est clair aujourd'hui que, pour la physique solaire, la distinction historique entre interne et externe n'est plus adaptée et qu'une vue globale de la dynamique et du magnétisme solaire est maintenant nécessaire. Le couplage entre les différentes couches du Soleil (dynamo en zone convective, activité photosphérique, chromosphérique et coronale) et son extension au milieu interplanétaire *via* le vent solaire font maintenant l'objet de nombreuses études au sein de la communauté PNST, permettant *de facto* à des groupes de cultures différentes d'échanger méthodes et diagnostics pour faire progresser notre compréhension du système Soleil-héliosphère.

Pour la période 2010-2013, un jalon important est la sélection par l'ESA de la mission Solar Orbiter comme mission M1 du programme Cosmic Vision (lancement prévu en juillet 2017). Cette mission qui comporte une forte contribution instrumentale de la communauté française, a pour objectif principal de comprendre comment le Soleil contrôle l'héliosphère, ce qui nécessite d'examiner le Soleil dans sa globalité et de considérer les couplages entre différentes couches et processus physiques. Parmi les autres faits marquants de la période 2010-2013, on notera la fin du cycle 23 qui a été particulièrement longue. De fait, le passage du cycle solaire 23 à 24 a été inhabituel et remet en cause certains présupposés quant à l'état de la couronne (dipolaire) et de l'héliosphère. Une première vue à 360° du Soleil a par ailleurs été obtenue en février 2011 à l'aide des satellites STEREO A et B et de SoHO en L1. Enfin, premier objet humain à quitter l'influence solaire, la sonde Voyager I est sortie de l'héliosphère en août 2012, ce qui a permis de caractériser l'héliopause.

#### 2.1.2. Résultats marquants

##### *☞ Couplage de l'intérieur solaire avec la couronne et le vent solaire*

Les études des interfaces physiques couplant intérieur et atmosphère solaire sont en plein essor. Ces études englobent l'émergence de flux conduisant aux éruptions et autres éjections de masse coronale qui se propagent sous la forme de nuages magnétiques. Elles s'appuient à la fois sur les mesures des satellites et sur le développement de modèles MHD de plus en plus sophistiqués et multi-échelles. Une première étape dans ces études est la compréhension de l'origine du champ magnétique *via* l'effet dynamo non-linéaire, ainsi que le transport de ce champ et ses différentes manifestations en surface. Le couplage entre zone convective et atmosphère solaire (et son prolongement sous forme de vent) est ici fondamental. Dans ce domaine, la communauté française est très active, et les modèles ou simulations numériques développés sont au plus haut standard international.

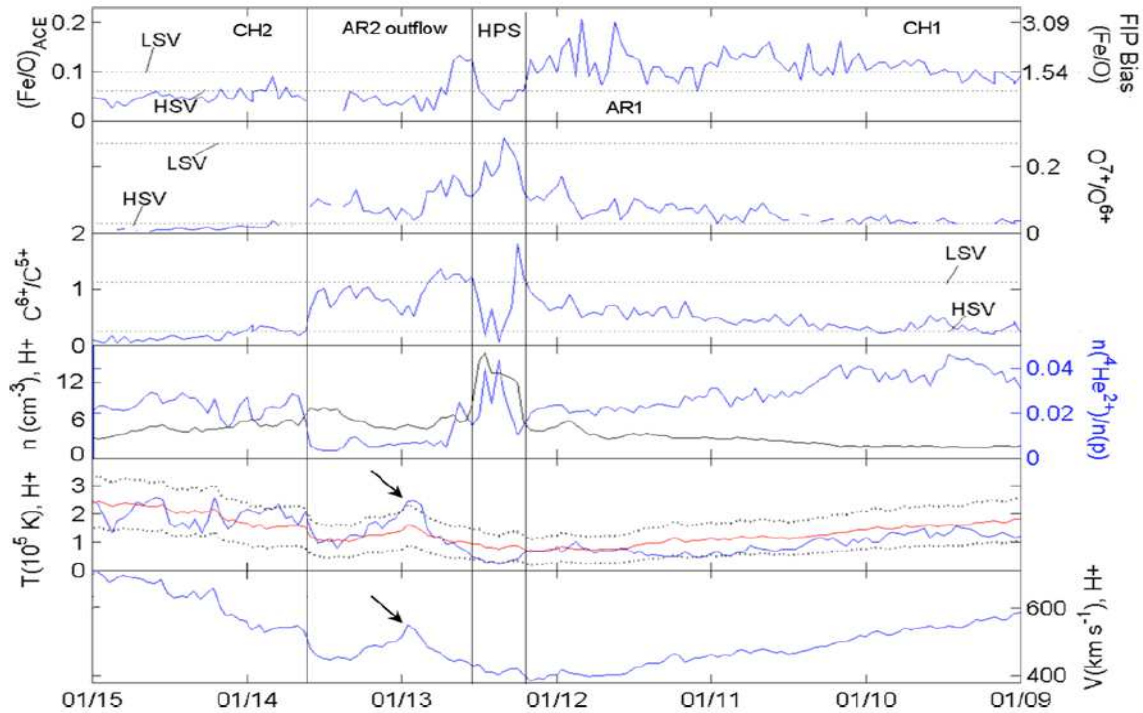


**Figure 2.1.1** : Couplage dynamo/couronne/vent au cours d'un cycle de 11 ans - codes MHD STELEM et DIP (Pinto *et al.*, 2011).

Un exemple en est donné dans la figure 2.1.1 qui montre les résultats obtenus pour l'évolution de la couronne et du vent solaire au cours d'un cycle de 11 ans *via* le couplage d'un code dynamo champ moyen (STELEM) avec un code de vent (DIP) (Pinto *et al.*, 2011). Cette figure met en évidence un déplacement latitudinal des « streamers ». Ceci conduit à une reconfiguration de la couronne et du vent avec l'apparition de plusieurs couches de courant, jusqu'à un renversement total de polarité et un retour vers une configuration dipolaire. Il apparaît en outre que la composante quadrupolaire joue un rôle important lors de tels renversements de polarité (Derosa *et al.*, 2012). A l'aide de simulations MHD et d'observations multi-instruments/multi-longueurs d'ondes, d'autres travaux ont porté sur le couplage entre émergence-éruptions et déclenchement-propagation de CMEs (e.g., Schrijver *et al.*, 2011 ; Aulanier *et al.*, 2013 ; Dalmasse *et al.*, 2013 ; Schmieder *et al.*, 2013). Des travaux sur l'émergence de structures magnétiques depuis la base de la zone convective et/ou la tachocline en présence ou non de champ magnétique ont été entrepris (e.g., Jouve *et al.*, 2013 ; Pinto et Brun, 2013) et la formation spontanée de ces structures a été réalisée pour la première fois à l'aide d'une simulation dynamo (Nelson *et al.*, 2013). Des observations simultanées de la photosphère et de la couronne ont par ailleurs permis une reconstruction 3D de l'atmosphère solaire (Faurobot *et al.*, 2012) tandis que le processus de reconnexion a été examiné en couplant des observations de SoHO-SDO-RHESSI avec des modèles MHD et hybrides. Il faut noter ici que le développement de l'hélio-sismologie permet d'étudier la dynamique interne du Soleil avant sa manifestation en surface, ce qui permet de relier couches intérieures et observations en surface (Garcia *et al.*, 2013 ; Simoniello *et al.*, 2012, 2013 ; Piau *et al.*, 2014). Notons également les nombreux travaux sur les protubérances solaires, concernant par exemple la structure des filets et des

environnements d'un filament de région active dans l'UV (Vial *et al.*, 2012) ou la mise en évidence d'instabilités "kink" à l'aide des données de AIA-SDO (Koleva *et al.*, 2012) et de flots de matière entre régions actives à l'aide des données HINODE (Boutry *et al.*, 2012).

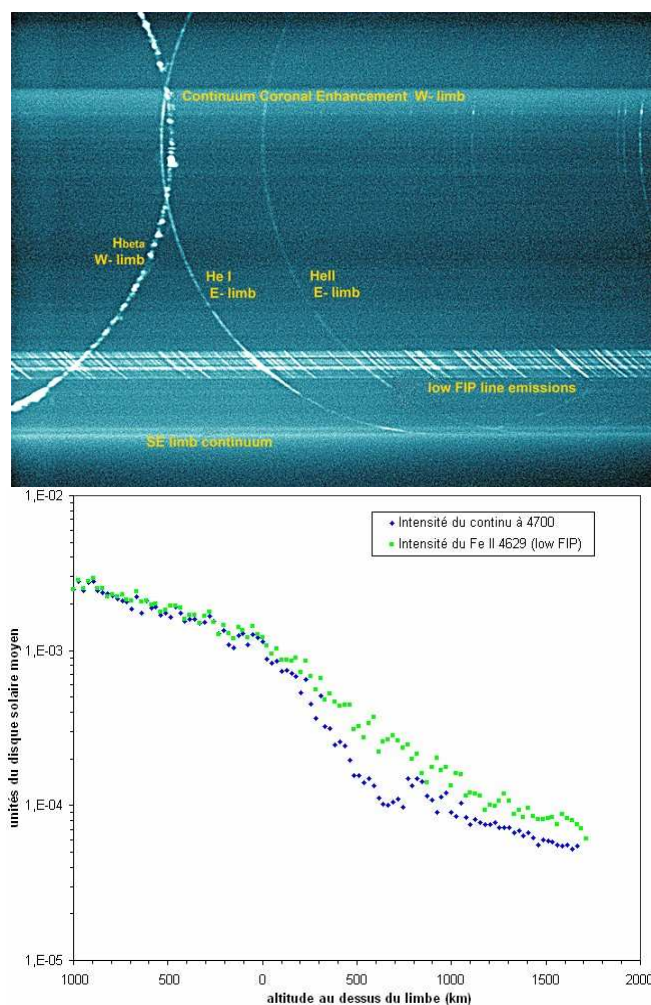
En s'appuyant notamment sur des données ACE, la figure 2.1.2 montre des événements observés dans le vent solaire avec leur source en surface (Van Driel Gesztelyi *et al.*, 2012). Cette figure met en évidence que la vitesse, la température et la composition chimique du vent varient en fonction de l'état dynamique des régions d'origine.



**Figure 2.1.2 :** Topologie magnétique des régions actives et implications pour les échappements coronaux (Van Driel Gesztelyi *et al.*, 2012).

D'autres travaux (Masson *et al.*, 2012) ont porté sur la relation entre la topologie du champ magnétique de surface et la production de particules énergétiques (SEP) se propageant dans le milieu interplanétaire, notamment sur les lignes de champ connectées à la Terre (voir §2.3). Comme mentionné ci-dessus (voir §1.2), les données STEREO et ACE permettent de suivre le vent solaire et les CMEs avec des vues multi-points très complémentaires depuis le Soleil jusqu'à l'orbite terrestre (Rouillard *et al.* 2010, 2011, 2012 ; Savani *et al.*, 2012). Des processus de reconnexion magnétique successifs semblent ici responsables de l'érosion des nuages magnétiques au cours de leur propagation (Ruffenach *et al.*, 2012). Pour leur part, Landi *et al.* (2012) ont examiné comment les collisions dans les simulations de vent à grande échelle peuvent être mieux prise en compte en couplant les résultats de codes N-corps dans des simulations du vent s'étendant jusqu'à 1 unité astronomique. Signalons enfin la mise en place de l'interface web HELIO qui permet d'utiliser des données multi-instruments pour suivre un événement entre le Soleil et la Terre (Perez-Suarez *et al.*, 2012).

Concernant l'interface photosphère-couronne, trois éclipses totales de Soleil ont été observées durant la période 2010-2013. Des milliers de spectres éclairs (et quelques images de la couronne blanche) ont été obtenus au moyen de nouvelles caméras CCD à cadence rapide (15 spectres/s) et d'un réseau imageur (spectrographie sans fente). Ces observations complétées par la couverture fournie en EUV par les observatoires spatiaux, permettent une résolution dans l'atmosphère solaire de quelques dizaines de kilomètres, limitée seulement par le limbe lunaire. Un exemple de spectre éclair et de profil de bord solaire obtenus lors de l'éclipse du 3 novembre 2013 en Ouganda est fourni dans la figure 2.1.3.



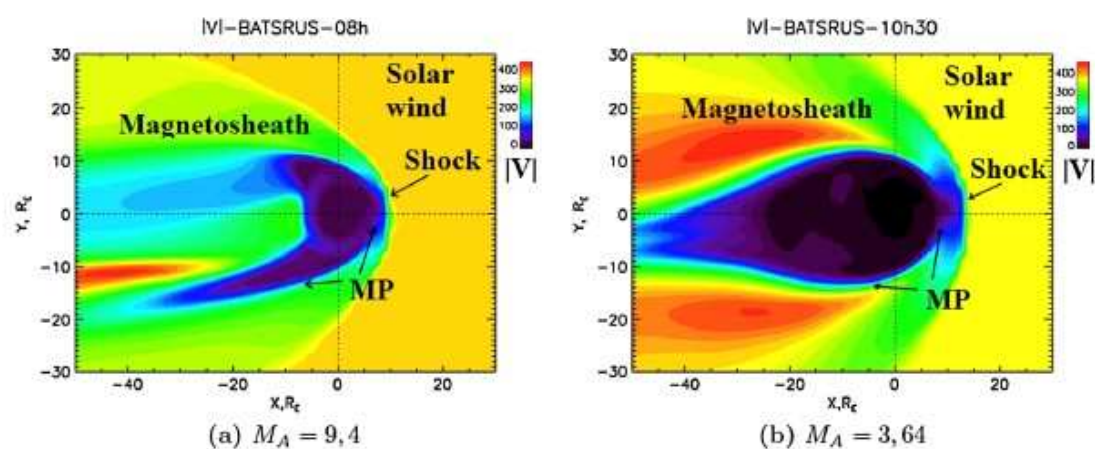
**Figure 2.1.3 :** (haut) Spectre éclair avec enveloppes d'hélium (high FIP) analysées jusqu'aux régions polaires en dessous de 800 km. (bas) Profil du vrai bord solaire défini par le spectre continu relevé entre les raies d'émission de bas potentiel d'ionisation (éléments low FIP) dans la région du minimum de température.

On notera que ces mesures sont affranchies de toute lumière parasite car l'occultation par la lune est parfaite dans l'espace.

#### ☞ Couplage entre plasmas du vent solaire et de la magnétosphère terrestre

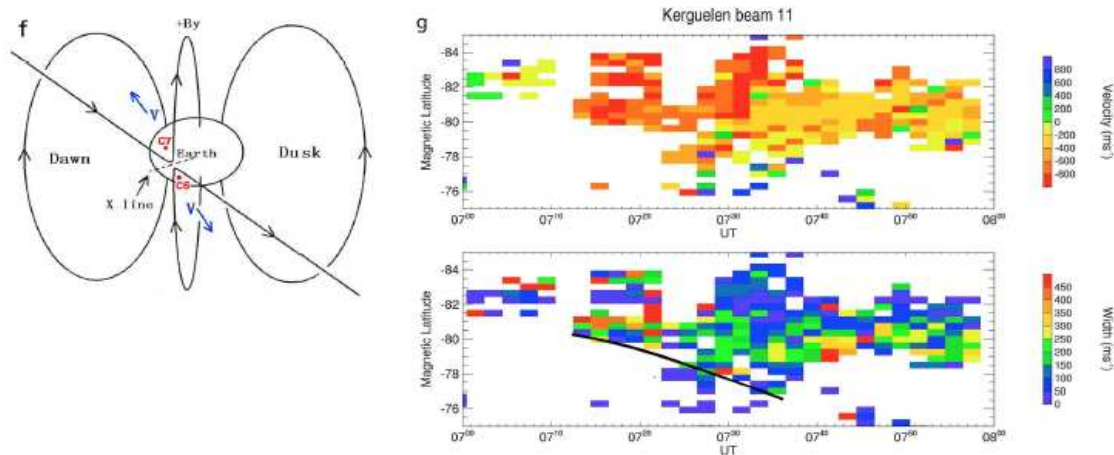
La circulation à grande échelle du plasma dans la magnétosphère terrestre est contrôlée par l'écoulement du vent solaire. Ce contrôle s'effectue principalement via la reconnexion

entre champs magnétiques terrestre et interplanétaire. A l'intérieur de la magnétosphère, les lignes de champ magnétique étant (au moins à grande échelle) équipotentielles, la convection magnétosphérique se projette dans l'ionosphère le long de ces lignes. Lorsque le champ magnétique interplanétaire est dirigé vers le sud, la reconnexion est grandement facilitée et se produit dans la région sub-solaire sur la face avant de la magnétosphère. Les transferts d'énergie et d'impulsion depuis le vent solaire vers la magnétosphère sont alors plus importants. Les lignes du champ magnétique terrestre reconnectées à l'avant de la magnétosphère sont entraînées vers la queue magnétosphérique par l'écoulement du vent solaire. La tension magnétique s'accumule dans la queue et est libérée principalement de manière impulsive lors d'événements appelés sous-orages. Les aurores sont aussi la manifestation de cette interaction vent solaire-magnétosphère. Si le champ interplanétaire prend une autre orientation (i.e., plutôt vers le nord et/ou forte composante dans la direction matin-soir), les phénomènes observés et leur amplitude diffèrent.



**Figure 2.1.4** : Asymétrie de la magnétopause et des écoulements dans la magnétogaine en présence de vent solaire lent et rapide (Lavraud *et al.*, 2013).

La figure 2.1.4 permet d'apprécier les changements drastiques d'interaction avec la magnétosphère lors du passage d'éjections de masse coronales au niveau de la Terre (Lavraud *et al.*, 2013). En raison de leur faible nombre de Mach alfvénique (dû à leur champ magnétique intense), la position du choc d'étrave et les écoulements dans la magnétogaine sont fortement altérés, et une accélération importante du plasma peut se produire le long de la magnétopause. La production de modes siffleurs et de trous électroniques lors de phénomènes de couplage a été étudiée à l'aide des données des satellites THEMIS (Tao *et al.*, 2011 ; Li *et al.*, 2013). Concernant la reconnexion des lignes de champ magnétique, une étude a été menée à l'aide des données des radars SuperDARN (voir §4.1.2). Ce réseau de radars cohérents HF fournit des observations continues de la convection du plasma ionosphérique dans les régions de haute latitude (zones aurorales et calotte polaire). La figure 2.1.5 extraite de Zhang *et al.* (2011) illustre comment les observations de ces radars permettent de suivre la reconfiguration globale des lignes de champ magnétique après reconnexion. Cette étude a permis de montrer que des variations de structure du champ magnétique interplanétaire et de la pression du vent solaire ne se propagent pas à la même vitesse dans la magnétogaine.



**Figure 2.1.5 :** Reconnaissance des lignes de champ magnétique sur la face avant de la magnétosphère vue par SuperDARN (Zhang *et al.*, 2011).

On notera enfin les différentes études concernant la dynamique de la magnétosphère de Mercure avec les données de MESSENGER, la préparation de BEPI COLOMBO (Richer *et al.*, 2012 ; Pantellini *et al.*, 2012 ; Delcourt *et al.*, 2010 ; Delcourt, 2013), ou l'érosion de l'atmosphère martienne par le vent solaire (Modolo *et al.*, 2012).

#### ☞ Couplage entre les plasmas de la magnétosphère et de l'ionosphère

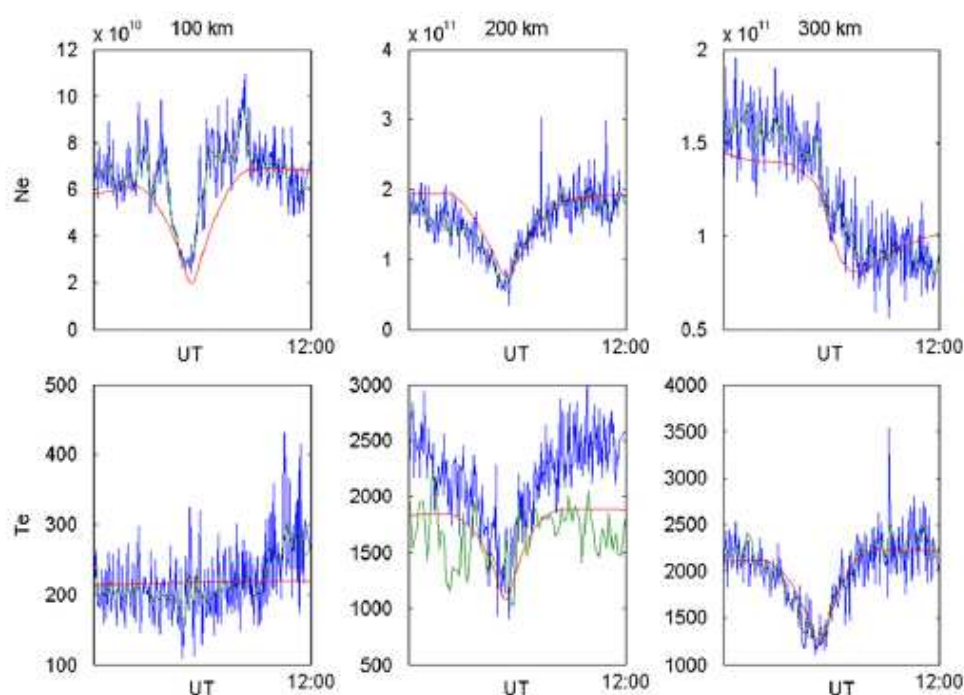
L'électrodynamique du système magnétosphère-ionosphère (thermosphère) résulte de stimuli (directs ou indirects) issus du vent solaire. A l'intérieur de la magnétosphère, le plasma du vent solaire diffuse le long des lignes de champ géomagnétique et coexiste avec le plasma ionosphérique. Les couplages entre la magnétosphère et l'ionosphère/thermosphère se font via la convection, les systèmes de courants et le chauffage Joule. Si cette chaîne de processus est bien comprise qualitativement, la modélisation quantitative des différents couplages reste difficile et fait l'objet de différentes études. Les données à partir du sol (EISCAT-ESR, SuperDARN, caméras plein ciel...) ou depuis l'espace avec CLUSTER, THEMIS ou encore DEMETER (jusqu'à la fin 2010) ont permis de progresser dans la compréhension de cette chaîne de processus. L'interprétation de ces données multi-instruments est rendue possible par l'utilisation de modèles numériques complexes. Ainsi, pour l'étude des couplages thermosphère-ionosphère-magnétosphère aux altitudes ionosphériques, l'équipe TIMME utilise le modèle ionosphérique TRANSCAR dans une version à 13 moments (disponible sur le portail AMDA), développé pour les hautes latitudes, dans les régions de forte interaction entre magnétosphère et milieu interplanétaire. Pour aborder ces couplages de manière plus globale, l'équipe TIMME a également développé un nouveau modèle ionosphérique interhémisphérique à 16 moments qui peut couvrir toutes les latitudes. Ce modèle va permettre en particulier d'étudier les couplages entre hémisphères nord et sud dans les régions de moyennes et hautes latitudes, pour comprendre par exemple les asymétries de convection observées avec SuperDARN.

Pour les autres planètes, on peut citer le travail en cours pour coupler le modèle d'atmosphère du LMD avec une version modifiée de TRANSCAR pour Mars ainsi que

l'utilisation de simulations hybrides pour l'étude du couplage plasma-neutres à Ganymède dans le cadre de la préparation de la mission JUICE. Notons également la détection directe, pour la première fois, d'un vent plasmasphérique transportant le plasma froid vers la magnétosphère externe à l'aide des mesures de CLUSTER-CIS (Dandouras, 2013), comme cela a été postulé à partir de calculs théoriques de stabilité du plasma.

### ☞ Couplage entre l'ionosphère et la haute atmosphère

Preuve s'il en est de l'importance de cette thématique, la mission TARANIS qui a pour objectif l'étude du couplage magnétosphère-ionosphère-atmosphère *via* des processus transitoires (à l'origine de phénomènes lumineux tels que « sprites » et autres « blue jets ») a été confirmée par le CNES (lancement prévu en octobre 2015). Pendant la période 2010-2013, la préparation de cette mission a occupé un nombre important de chercheurs. Pour sa part, la mission DEMETER dédiée au couplage ionosphère-activité sismique s'est terminée en 2010.



**Figure 2.1.6 :** Eclipse du 1er août 2008 : séries temporelles de la densité électronique (haut) et de la température (bas) observées par le radar UHF à Tromsø avant (bleu) et après post-analyse (vert). Les résultats du modèle TRANSCAR à 100, 200, et 300 km d'altitude sont également indiqués (en rouge) (Pitout *et al.*, 2013).

L'ionosphère polaire joue un rôle-clé dans le couplage entre vent solaire et atmosphère terrestre. Comprendre les lois physiques qui régissent sa formation, son comportement, sa thermodynamique est ainsi un enjeu important, en particulier au moment où se développe la météorologie de l'espace (voir §2.5). Dans cette logique, les radars à diffusion incohérente en général – et ceux de l'organisation scientifique EISCAT en particulier – constituent un outil incontournable. Ce sont en effet les seuls instruments au sol à même de fournir les paramètres physiques (concentration, température, vitesse) indispensables à l'étude du

couplage ionosphère-atmosphère. Des études récentes utilisant notamment les données EISCAT ont par exemple permis d'examiner l'impact d'une éclipse solaire sur l'état et la dynamique de l'atmosphère (Pitout *et al.*, 2012, 2013). La comparaison menée avec des simulations utilisant le modèle TRANSCAR révèle un bon accord qualitatif, comme cela est illustré dans la figure 2.1.6. Le Groupe Multi-Instruments (GMI, puis GMI-2), de son côté, s'est intéressé à l'impact des CME sur la thermosphère (Lathuillère *et Menvielle*, 2010). Après plusieurs tentatives infructueuses, la découverte de la polarisation de la raie rouge dans les aurores polaires (Lilensten *et al.*, 2008) a été confirmée et l'évolution de la polarisation a été caractérisée (Barthélémy *et al.*, 2011). Enfin, le couplage entre irradiance solaire et thermosphère a également fait l'objet d'une étude visant à comprendre le forçage atmosphérique associé aux modulations du spectre solaire (Dudok de Witt *et Bruisma*, 2011).

Pour les planètes géantes du système solaire, la raie Lyman-alpha dans l'UV lointain est la raie d'émission thermosphérique la plus intense (Ménager *et al.*, 2013). Sa recherche pour d'autres « Jupiter » chauds permettra de caractériser les atmosphères exo-planétaires. Des travaux mettant en perspective les environnements magnétisés et ionisés des planètes géantes, de la Terre et des exo-planètes ont été menés pour caractériser ce couplage magnétosphère-ionosphère-atmosphère, les émissions radio, et les ceintures de radiation (Zarka *et al.*, 2012).

## **2.2. Turbulence et transport d'énergie multi-échelles**

### **2.2.1. Contexte**

La question du transport de l'énergie dans un plasma peu collisionnel - et en particulier comment elle se transfère aux différentes échelles - reste à ce jour fondamentale et universelle en astrophysique. Comment l'énergie est-elle injectée ? Comment cascade-t-elle dans les plasmas photosphériques, coronaux et héliosphériques (vent solaire par exemple) ? Quel est le régime de turbulence dans ces milieux anisotropes ? C'est l'un des sujets activement étudiés par notre communauté, et plusieurs ateliers PNST et SF2A y ont été consacrés. L'un des enjeux est la compréhension des processus de chauffage de la couronne solaire et de l'accélération du vent solaire, ainsi que la détermination des échelles caractéristiques de la dissipation de l'énergie des fluctuations turbulentes du vent solaire qui cascadedent des grandes vers les petites échelles par interactions non-linéaires.

### **2.2.2. Résultats marquants**

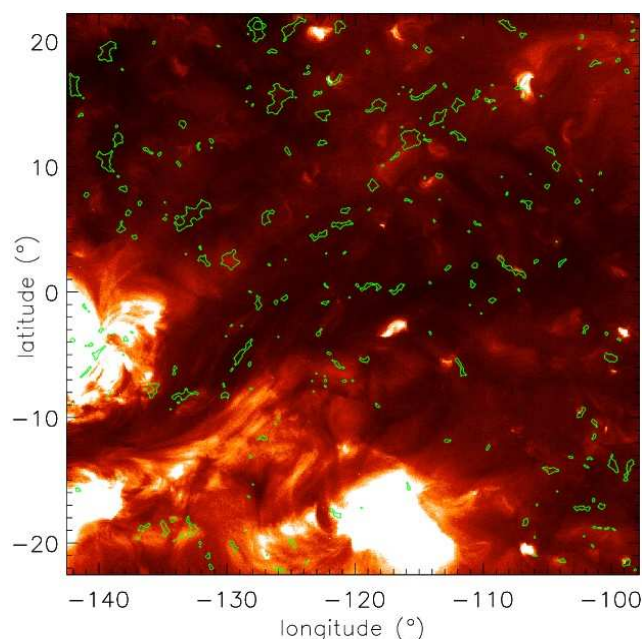
#### *☞ Dynamique et chauffage de l'atmosphère solaire*

L'étude des structures magnétiques qui tapissent la surface du Soleil est un sujet largement étudié par notre communauté. L'évolution dynamique et le couplage des différentes couches atmosphériques solaires (photosphère, chromosphère, et couronne) dépendent fortement de l'activité le long des boucles ou des lignes ouvertes du champ magnétique. Par exemple, les observations EUV de SoHO et de STEREO montrent que les structures magnétiques sont la source d'une intense activité qui se manifeste par une émission lumineuse intermittente, tant dans l'espace que dans le temps. Une vue globale du



Soleil à ces longueurs d'onde révèle la présence d'une multitude de structures imbriquées sur une large gamme d'échelles spatiales (de  $10^7$  m jusqu'à la limite de résolution instrumentale, de l'ordre de l'arc seconde). En outre, une vue dynamique de la couronne met en évidence une excitation sur une large gamme d'échelles temporelles (de quelques jours jusqu'à une fraction de seconde). Le caractère hautement dynamique de certaines boucles coronales apparaît par exemple dans les mesures de vitesses non-thermiques (pouvant parfois atteindre 40-50 km/s) qui ont été obtenues avec l'instrument SUMER à bord de SoHO. Ces observations révèlent que l'élargissement des raies provient de mouvements non résolus à la fois spatialement (avec des échelles inférieures au diamètre des boucles coronales) et temporellement (avec des temps inférieurs au temps d'exposition, de l'ordre de la seconde). Ces mesures de vitesses sont souvent interprétées comme une signature de la turbulence du plasma solaire où les petites échelles spatiales sont générées suite à une cascade non-linéaire.

L'effet de la région de transition sur la propagation des ondes d'Alfvén reste aujourd'hui à élucider. Un autre enjeu est de comprendre comment l'énergie se dissipe à très petite échelle spatiale dans de fines sous-boucles (ou tubes de flux « élémentaires » rendus indépendants du point de vue thermodynamique par la faible conduction thermique transverse au champ magnétique) dont l'existence est suggérée par de nombreuses observations. Les résultats de modèle MHD en couches (*Buchlin et al., 2007*) pourront être comparés aux observations, soit directement (via des observables dans les raies UV), soit à l'aide de diagnostics thermiques basés sur l'émission de mesure différentielle (DEM) comme ceux de *Guennou et al. (2012)*.



**Figure 2.2.1 :** Embrillancements coronaux (contours verts) dans la bande à 19.3 nm de SDO/AIA (*Joulin, 2013*).

Par ailleurs, l'observation de petits embrillancements en extrême UV, conséquences d'événements de chauffage coronal à petite échelle, est améliorée grâce à l'excellente résolution spatiale et temporelle de SDO (*Joulin, 2013*), comme cela est illustré dans la figure 2.2.1. Il est ainsi possible de détecter des embrillancements bien plus petits et bien plus courts qu'avec SoHO. Par rapport aux précédentes études statistiques d'événements de

chauffage utilisant les données EIT-SoHO, l'originalité de ces travaux réside dans l'utilisation des multiples bandes de l'imageur AIA-SDO pour obtenir une estimation plus précise des énergies et des distributions de ces événements. Par exemple, la pente des histogrammes en énergie selon qu'elle est supérieure ou inférieure à -2 indique si les petits événements participent au chauffage plus ou moins que les gros événements. Cette question fait l'objet d'autres études, notamment à l'aide des observations spectroscopiques de EIS-Hinode.

Des mesures avec le télescope THEMIS en mode MTR (*Bommier, 2011*) ont montré que les champs forts concentrés du Soleil calme sont plutôt verticaux alors que les champs plus faibles ont de fortes inclinaisons. Ces résultats sont cohérents avec des structures magnétiques en forme de tubes qui s'évasent, comme le montrent aussi les observations avec le polarimètre ZIMPOL installé à THEMIS (*Stenflo, 2013*). *Milic & Faurobert (2012)* ont mesuré de très forts gradients du champ magnétique dans la haute photosphère solaire qui semblent incompatibles avec une distribution isotrope des champs, mais qui seraient compatibles avec des structures sous forme de boucles magnétiques à petite échelle.

Récemment, les mesures de THEMIS ont mis en évidence des distributions turbulentes du champ magnétique dans la photosphère calme, ce qui n'est guère surprenant vu le nombre de Reynolds dans ces régions mais qui va à l'encontre du scénario traditionnel en termes de structures magnétiques. Les derniers résultats observationnels de THEMIS permettent d'estimer le spectre d'énergie magnétique dans le Soleil calme jusqu'à des échelles du km. *Lopez et al. (2012)* ont ainsi montré comment les profils observés diffèrent radicalement de ceux obtenus à partir de simulations MHD, ce qui impose de poursuivre l'effort numérique pour décrire des plasmas avec des nombres de Reynolds plus élevés et dans des situations géométriques plus proches de la réalité.

L'étude du magnétisme solaire requiert l'observation de mécanismes sur une grande gamme d'échelles spatiales et temporelles, ainsi que leur évolution 3D depuis la photosphère (voire depuis la sub-photosphère) jusqu'à la couronne. Le rôle des très petites échelles est maintenant bien reconnu. Citons par exemple la concentration du champ magnétique photosphérique dans les zones intergranulaires, l'émergence de flux magnétique et les processus de reconnexion associés, ou encore la filamentation des protubérances solaires. L'accès à la structure 3D du couplage entre la dynamique du plasma et le champ magnétique est particulièrement important pour tester les différents modèles. En ce qui concerne la couronne, les régions les plus basses jouent vraisemblablement un rôle dans les processus de chauffage et d'éjection de masse coronale, mais l'observation en coronographie de ces régions très proches du disque est difficile. Au sol, hormis pendant les éclipses, elle nécessite d'une part un bon site d'observation, d'autre part une bonne extinction de la lumière diffractée par la pupille. Les techniques d'apodisation de pupille semblent pouvoir apporter un gain important pour l'observation de la très basse couronne, et de telles techniques sont en cours d'étude (en particulier dans le contexte du développement de la magnétométrie coronale au sol et dans l'espace). Pour accéder aux structures tri-dimensionnelles à haute résolution spatiale, des techniques de spectro-imagerie donnant accès aux régions de la photosphère à la couronne sont également mises en œuvre.

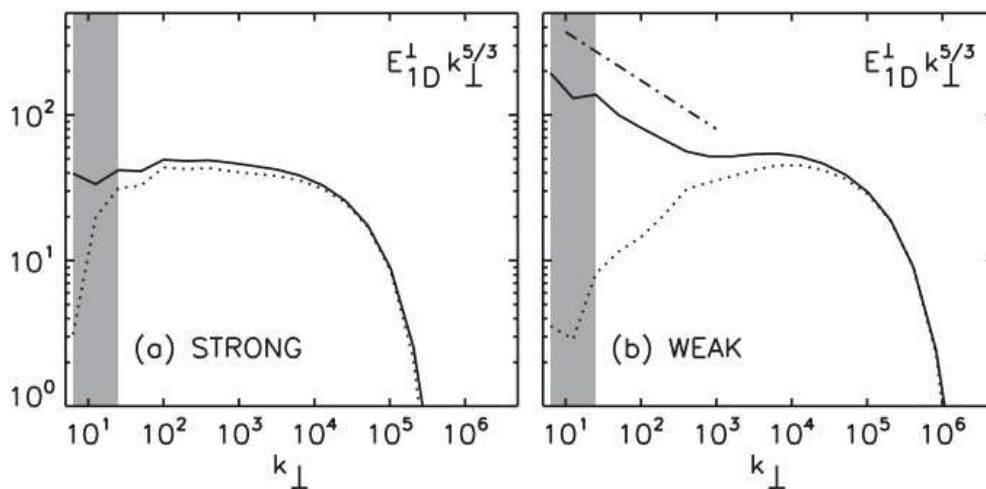
L'utilisation de l'effet Hanlé sur des raies moléculaires de C<sub>2</sub> et MgH observées à

l'extrême limbe solaire permet de contraindre les champs magnétiques faibles ou turbulents présents à la base de la chromosphère (dans la région du minimum de température), région pour laquelle il existe peu de diagnostics observationnels à l'heure actuelle (voir, par exemple, diagnostic des champs magnétiques photosphériques et chromosphériques à petite échelle par des méthodes spectro-polarimétriques à THEMIS en 2009 ou à Sacramento Peak en 2010, ou encore les archives en libre accès du satellite HINODE). Un code de transfert de rayonnement polarisé hors-ETL a été développé pour un milieu à symétrie sphérique décrit par des modèles semi-empiriques du Soleil calme. *Milic et Faurobert (2012)* ont ainsi montré que les raies de  $C_2$  observées en émission au limbe solaire sont sensibles à l'effet Hanlé, et ces auteurs ont développé une méthode d'inversion utilisant cet effet dans différentes raies de la molécule  $C_2$  pour déterminer les champs magnétiques turbulents à petite échelle.

On notera enfin que le chauffage de la couronne n'affecte pas toutes les espèces de particules de la même façon. Ce fait, déduit auparavant de mesures in situ à 1 UA et d'observations en EUV, a été confirmé par la spectro-imagerie avec le NRH. En effet, les températures des électrons qui déterminent l'intensité du rayonnement radio, se révèlent régulièrement inférieures (d'un facteur 2 environ) à la température moyenne de la couronne, ce qui suggère que les électrons ont une température nettement inférieure aux protons et aux ions (*Mercier et Chambe, 2012*).

#### ☞ Modèles et simulations de turbulence MHD

La turbulence est caractérisée en partie par le spectre d'énergie dans l'espace de Fourier, associé en général à un flux des grandes vers les petites échelles. Dans le cas collisionnel, les termes visqueux et résistifs permettent la transformation à petite échelle de ce flux en chaleur, et la forme du spectre avec son flux peut déterminer le taux de chauffage. Lorsqu'aucune direction n'est privilégiée, la cascade est isotrope et la phénoménologie de *Kolmogorov (1941)* décrit bien le spectre et la dissipation. Ceci n'est pas le cas si l'isotropie est brisée, et des travaux ont été menés sur trois aspects différents : champ magnétique moyen, forte stratification, expansion anisotrope due à un vent radial.



**Figure 2.2.2 :** Modèle multi-couches permettant d'atteindre un nombre de Reynolds de l'ordre de  $10^6$ . Gauche : cascade d'énergie en  $k^{-5/3}$  caractéristique du régime de turbulence

« forte ». Droite : un régime de turbulence « faible » (avec un exposant -2) à grande échelle précède celui de turbulence « forte » (avec un exposant -5/3) à petite échelle.

En présence de stratification forte (par exemple, dans la transition chromosphérique), la vitesse d'Alfvén subit un saut qui transforme les boucles fermées en piège à ondes, et un mécanisme de chauffage possible de la couronne est la dissipation turbulente de ces ondes. Pour caractériser ce chauffage, il est nécessaire de décrire d'une part la transmission qui dépend de la fréquence de l'onde, et d'autre part la dissipation turbulente dans le piège coronal. L'expression classique du taux de chauffage repose sur l'hypothèse que la dissipation turbulente est plus rapide que le temps de fuite hors de la cavité. Il ressort de l'étude de *Verdini et al.* (2011) que cette hypothèse est fautive et que le taux de chauffage est plus faible que prévu. Le cas du chauffage coronal dans les régions fermées a par ailleurs été abordé. Ces travaux montrent que le taux de chauffage est affaibli par la fuite des ondes introduites depuis la surface dans les cavités coronales, une partie de l'énergie piégée échappant presque complètement à la dissipation turbulente (*Verdini et al.*, 2012). Concernant le chauffage et l'accélération dans les régions ouvertes, il apparaît que les réflexions successives dans la basse couronne mènent à la formation d'une turbulence mixte faible et forte (en  $1/f$ ), probablement à l'origine du spectre de même pente observé entre 0.3 et 1 AU (*Verdini et al.*, 2012). Comme cela est illustré dans la figure 2.2.2, cette mise en évidence numérique de la coexistence des régimes "faible" et "fort" à partir d'un modèle des équations de la MHD (*Verdini et al.*, 2012) est une première, sans doute en raison du nombre de Reynolds limité dans les simulations numériques directes de MHD qui ne permettent d'avoir accès qu'à une seule zone inertielle. Ce résultat démontre à la fois la solidité des arguments théoriques décrivant la cascade MHD (*Goldreich & Sridhar*, 1995 ; *Galtier et al.*, 2000) et l'intérêt du modèle multi-couches. Remarquons que le modèle utilisé ici est issu d'un modèle développé dans le contexte solaire pour étudier la turbulence et le chauffage dans la couronne fermée (*Buchlin et Velli*, 2007) et ouverte (*Verdini et al.*, 2009).

La modélisation des grandes échelles, et en particulier des structures magnétiques solaires, est nécessaire pour comprendre à la fois la variabilité temporelle et la structure 3D du vent et de la couronne. Pour examiner le rôle des ondes d'Alfvén dans le chauffage de la couronne, il est nécessaire de suivre de façon détaillée leur propagation le long des structures magnétiques coronales. Les premiers modèles (quasi-) isothermes et axisymétriques n'incluaient pas de stratification forte associée à la présence de la transition chromosphérique et permettant de décrire le filtrage des ondes depuis la surface. Un modèle 3D pour les zones fermées où la couronne est à la fois chauffée par dissipation ohmique à nombre de Reynolds modéré et alimentée par les mouvements photosphériques a été précédemment développé (*Gudiksen et Nordlund*, 2005), mais aucun modèle 3D global incluant zones fermées, zones ouvertes et vent n'existe à l'heure actuelle. A cet égard, une question intéressante est l'origine des plumes solaires et des plumes géantes (« pseudo-streamer ») qui se trouvent dans les régions monopolaires à grande échelle. Les propriétés de la couronne et du vent au-dessus de ces structures peuvent être déduites d'une structure double bipôle avec un point X en faisant deux types d'hypothèses complètement opposées, à savoir : l'excitation d'ondes d'Alfvén à la surface du Soleil dans un modèle isotherme axisymétrique (*Pinto et al.*, 2010) ou le chauffage de la partie basse de l'atmosphère solaire dans un modèle 1D thermique (*Grappin et al.*, 2011). Il est intéressant de réconcilier ces

deux mécanismes en étudiant la réponse de la structure magnétique aux oscillations alfvéniques de surface dans le cadre d'un modèle axisymétrique avec chauffage, et une simulation numérique 2.5D a ainsi été menée pour étudier la réaction des structures coronales aux ondes d'Alfvén en faisant varier le coefficient de réflexion des ondes. Un code 1D bi-température est utilisé en parallèle pour décrire l'effet de la non-uniformité de l'expansion des tubes sur le vent qui s'échappe au-dessus des plumes.

La turbulence Langmuir est un archétype de turbulence d'ondes. Via des simulations 1D-1V Vlasov-Poisson, *Henri et al.* (2011) ont montré que des structures turbulentes appelées "cavitons de Langmuir" sont générées lors de l'évolution à long terme de la turbulence faible, illustrant ainsi une rupture dans le régime de cette turbulence. Les "cavitons Langmuir" sont des structures typiques de la turbulence Langmuir (ou turbulence forte) saturant à des énergies élevées. L'étude de *Henri et al.* (2011) montre que de telles structures peuvent aussi apparaître à des énergies plus faibles, c'est-à-dire dans une gamme de régimes jusqu'ici négligée. La transition vers la turbulence forte résulte alors d'une cascade inverse de la turbulence faible. Ces résultats suggèrent de réexaminer les mesures in-situ pour rechercher les signatures de tels cavitons. Pour la première fois, à l'aide des données de STEREO/WAVES, *Henri et al.* (2011) ont par ailleurs mis en évidence un couplage entre la dynamique des ions et celle des électrons via les effets pondéromoteurs liées aux ondes de Langmuir. Ils ont ainsi proposé une nouvelle méthode pour déterminer les fluctuations de densité du milieu à des échelles de quelques centaines de longueur de Debye, en utilisant les variations de potentiel de la sonde. Cette technique pourra être utilisée par d'autres sondes telles que Solar Orbiter pour tester les processus se déroulant aux échelles de dissipation de la turbulence dans le milieu interplanétaire.

#### ☞ *Effet dynamo*

Afin de comprendre comment le champ magnétique du Soleil est organisé à des échelles plus grandes que celles présentes dans son champ de vitesse (dynamo dite « globale »), il est nécessaire de comprendre comment l'énergie magnétique et l'hélicité magnétique sont transférées entre les différentes échelles et comment champ magnétique et champ de vitesse interagissent non linéairement. Dans ce but, un diagnostic novateur basé sur des harmoniques sphériques et permettant de calculer les interactions triadiques d'ondes sur la sphère a été développé et implanté dans un code MHD. Il est maintenant possible de calculer les couplages possibles (et ceux qui ne le sont pas) pour obtenir des cartes 2-D des interactions triadiques. *Strugarek et al.* (2013) ont ainsi pu montrer comment dipôle et quadripôle axisymétriques sont générés par le processus dynamo dans une enveloppe convective solaire. Il a également été possible de caractériser la cascade d'énergie magnétique. Ce travail est actuellement poursuivi pour caractériser les cascades d'énergie cinétiques et celles d'hélicité magnétique dans la zone convective solaire. Par ailleurs, le premier modèle numérique couplant la dynamo solaire et la couronne a été développé, permettant la prédiction de la variation du taux de perte de masse au cours d'un cycle solaire (*Pinto et al.*, 2011).

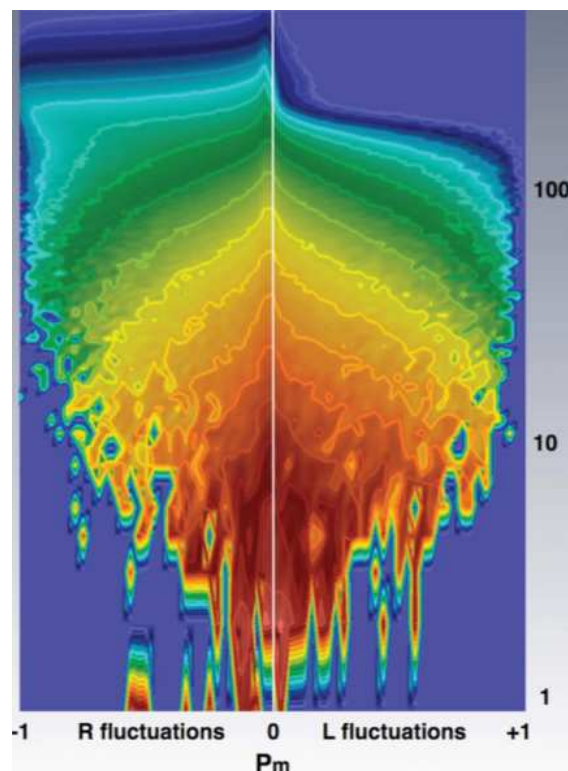
Parmi les faits marquants, citons enfin l'étude de l'effet dynamo en phase cinématique de croissance exponentielle du champ magnétique à l'aide d'un modèle MHD en couches. Ce travail a permis de montrer que la dynamo turbulente est intermittente avec une

contribution faible des transferts d'énergie non-locaux dans le spectre, et que le nombre de Reynolds magnétique critique semble atteindre une limite finie lorsque le nombre de Reynolds cinétique croît vers l'infini (*Buchlin, 2011*).

### ☞ *Vent solaire*

La nature des petites échelles de la cascade turbulente dans le vent solaire fait l'objet de nombreuses discussions et controverses. La difficulté vient du fait que le vent solaire est un plasma peu collisionnel et qu'il existe donc plusieurs niveaux de description selon l'échelle considérée. Inclure toutes les échelles dans un même modèle s'avère trop lourd. Se restreindre à une gamme limitée d'échelles n'est pas non plus pertinent puisque la turbulence les couple entre elles. Il est donc nécessaire de trouver un compromis entre modèle fluide et modèle cinétique. La prise en compte de l'effet Hall dans les équations de la MHD a permis de répondre partiellement à cette problématique. Dans ce cadre, une loi universelle a été obtenue pour la turbulence électron-MHD lorsque l'échelle de longueur est plus petite que la longueur d'inertie des électrons (*Meyrand et Galtier, 2010*) alors qu'à plus grande échelle des simulations numériques directes de MHD Hall 3D ont démontré l'existence d'une asymétrie liée à la polarisation (droite ou gauche) des fluctuations (*Meyrand et al., 2012*). Ceci est illustré dans la figure 2.2.3.

La cascade dans le vent solaire se termine par une dissipation sur une échelle de l'ordre du rayon de giration des électrons. L'amplitude des spectres aux échelles cinétiques (i.e., en d'autres termes, le niveau de turbulence) semble être déterminée par la pression thermique et l'anisotropie de température des protons dans le vent solaire. Ces résultats suggèrent que les instabilités d'anisotropie peuvent jouer un rôle d'injection ou de dissipation de l'énergie turbulente sur les échelles ioniques (*Alexandrova et al., 2013*), en bon accord avec les conclusions de *Matteini et al. (2007)*. La cascade turbulente magnétique directe des échelles MHD vers les petites échelles se terminerait donc à l'échelle de giration des électrons autour du champ magnétique (voir figure 1.2.2). On notera à cet égard qu'une dépendance entre pression thermique et amplitude des spectres aux échelles cinétiques a été observée dans la magnétosphère de Saturne, ce qui suggère un phénomène général pour la turbulence dans les plasmas astrophysiques (*von Papen et al., 2013*).



**Figure 2.2.3 :** Spectre de l'énergie magnétique en fonction du nombre d'ondes ( $k$ ) et de la polarisation (droite-R et gauche-L) obtenu à partir d'une simulation numérique MHD-Hall. Deux lois de puissance différentes peuvent être mesurées selon la polarisation (en  $k^{-7/3}$  pour R, et en  $k^{-11/3}$  pour L). D'après *Meyrand et al.* (2012).

Dans la région en amont du choc terrestre (« foreshock »), la forme spectrale présente une bosse qui suggère la présence d'ondes monochromatiques à l'échelle du rayon de giration des électrons (*Alexandrova et al.*, 2013). Une analyse statistique des données CLUSTER dans cette région ainsi qu'une comparaison avec des simulations numériques (PIC et hybrides) a permis de reconstituer précisément le comportement non-stationnaire et turbulent du choc sur des échelles spatio-temporelles très différentes. L'identification des mécanismes responsables de la non-stationnarité et de la macro/micro-turbulence permet d'explorer les conséquences sur l'accélération et le chauffage des particules, par exemple la production de distributions ioniques non-Maxwelliennes dans le pré-choc. Ces résultats sont également appliqués à d'autres environnements (Mars, Vénus, Saturne) ou encore au choc héliosphérique.

En parallèle, la détermination des anisotropies spatiales de la turbulence, les lois d'échelle correspondantes et les modes plasmas impliqués dans la cascade turbulente ont été étudiés. L'analyse des données de l'expérience STAFF-SC à haute résolution (jusqu'à 180 Hz) a révélé que la cascade de l'énergie se développe jusqu'à des échelles inférieures au rayon de giration des électrons où la dissipation devient plus importante (*Sahraoui et al.*, 2009). L'utilisation de la technique dite de « filtrage-en- $k$  » (*Pinçon et Lefeuvre*, 1991) a permis de montrer que la turbulence est fortement anisotrope aux échelles sub-protoniques et qu'elle est dominée par les modes d'Alfvén cinétiques (« KAWs ») et non pas par des modes siffleurs (« whistler ») magnétosoniques comme cela était supposé (*Sahraoui et al.*,

2010). Une explication théorique simple a été proposée en étudiant les propriétés de ces deux modes pour des paramètres réalistes du vent solaire (*Sahraoui et al.*, 2012). Ces résultats ont été confirmés par d'autres études statistiques utilisant un large échantillon de dix années de données CLUSTER dans le vent solaire (*Sahraoui et al.*, 2013). Ces études aident par ailleurs à caractériser la turbulence contrôlant une onde de choc sans collision (*Mazelle et al.*, 2013).

Le vent solaire étant un plasma peu collisionnel multi-échelles, il est important d'améliorer nos modèles. Dans ce cadre, un nouveau modèle fluide a été développé. Ce modèle dit « Landau-fluide » (*Hunana et al.*, 2011) s'applique jusqu'aux échelles ioniques (ou légèrement au-delà) dans les directions transverses pour des anisotropies de température et des paramètres « beta » arbitraires. Ce modèle inclut l'effet Landau ainsi que des corrections de rayon de Larmor fini pour tous les moments retenus. Il correspond au minimum de complexité nécessaire pour reproduire précisément les propriétés linéaires des ondes d'Alfvén cinétiques et décrire correctement l'instabilité miroir, tout en reproduisant la MHD anisotrope à grande échelle. En utilisant une version du modèle pour les échelles grandes devant le rayon de Larmor des ions, il a été possible de montrer que les ondes linéaires persistent en régime de turbulence développée et que l'effet Landau ionique joue un rôle dans la compressibilité magnétique et l'anisotropie des transferts non-linéaires. A l'aide de ce modèle avec une dimension d'espace, un mécanisme de chauffage du plasma analogue au chauffage stochastique a été mis en évidence suite au travail des forces de pression non-gyrotrape, et il a été montré que le développement de l'anisotropie de température est limité par le seuil de l'instabilité miroir, conformément aux mesures de SWE-WIND dans le vent solaire lent. Le modèle complet 3D fournit un outil prometteur pour simuler la turbulence alfvénique en l'absence de résonance cyclotron. Les premières simulations de la cascade alfvénique et des structures miroir résultant de la saturation de l'instabilité ont été réalisées et il apparaît que, si la simulation retient des échelles suffisamment petites, l'introduction d'une quelconque régularisation numérique n'est pas nécessaire, du fait de la présence des effets dispersifs et de l'effet Landau dû aux ions et aux électrons. Ceci permet une utilisation optimale de la résolution.

La turbulence dans le vent solaire est caractérisée par une anisotropie importante due à la présence du champ magnétique moyen, mais aussi par des effets de compressibilité importants à la frontière entre différents types de vent solaire. Il est maintenant important d'en analyser les effets sur les taux de cascade turbulente ainsi que sur la forme des spectres dans les différentes directions et aux différentes échelles. Des simulations numériques de turbulence incompressible utilisant le forçage de Taylor-Green (globalement anisotrope et inhomogène) ont permis d'étudier l'évolution de l'anisotropie en fonction des échelles et il apparaît que cette anisotropie persiste aux petites échelles, au moins pour des nombres de Reynolds modérés. La forme anisotrope de la relation de Kolmogorov reste valable, même en présence d'anisotropies (*Galtier*, 2012) et d'inhomogénéités locales. Parallèlement, *Grappin et Muller* (2010) ont développé un modèle 3D co-mobile pour étudier la formation de l'anisotropie particulière dans le vent solaire et celle du spectre en énergie. Il ressort de cette étude qu'une cascade d'énergie a lieu à partir d'une échelle légèrement inférieure à celle du forçage, que cette cascade n'est pas purement radiale mais nécessite une redistribution de la direction perpendiculaire vers la direction parallèle. L'anisotropie du spectre est d'autant plus forte que le champ magnétique ambiant est fort.



## 2.3. Mécanismes d'accélération et de chauffage du plasma

### 2.3.1. Contexte

Les mécanismes d'accélération et de chauffage du plasma entrent en jeu depuis la surface du Soleil jusqu'à la magnétosphère interne de la Terre. La couronne solaire est le siège de phénomènes éruptifs dont le lien avec des flux de particules de très hautes énergies fait l'objet de nombreuses études. Le vent solaire où les ions majoritaires (protons) ont des énergies de l'ordre du kilo-électronVolt (keV) est une des sources de plasma de la magnétosphère. L'autre source est l'ionosphère de la Terre, à l'origine d'un flux de plasma beaucoup moins énergétique (typiquement quelques eV). En maintes régions de la magnétosphère, on trouve cependant des flux de particules dont l'énergie atteint plusieurs keV ou plusieurs dizaines de keV (queue magnétosphérique, zone aurorale), ou même plusieurs MeV (ceintures de radiation). Le plasma est donc accéléré en différents lieux de la magnétosphère. Les manifestations visibles des particules accélérées qui atteignent l'ionosphère sont les aurores polaires, mais ces particules ont également une signature radio. Les études multi-instrumentales sur les processus d'accélération sont donc souvent complétées par des observations aurorales ou radio depuis l'espace (ou à partir du sol pour certaines planètes géantes comme Jupiter et Saturne). Ces mécanismes d'accélération sont au cœur de nombreux travaux au sein du PNST. Ces travaux fondés sur des observations, des simulations numériques et/ou des calculs analytiques, font apparaître des mécanismes très différents qui dépendent fortement du régime de plasma, de la topologie du champ magnétique, et de la nature des ondes qui s'y développent. Ces mécanismes sont généralement favorisés par les phénomènes éruptifs et ils engendrent souvent de la turbulence à petite échelle. A l'inverse, la turbulence générée par des processus à grande échelle peut favoriser l'accélération des particules (notamment par des ondes).

### 2.3.2. Résultats marquants

Les processus d'accélération dans les plasmas du système solaire agissent dans des gammes d'énergie très variables. L'énergie des particules les plus rapides, qu'il s'agisse des particules solaires énergétiques (SEP) ou des ceintures de radiation de la Terre et des planètes géantes, dépasse régulièrement la centaine de keV et les spectres d'énergie peuvent atteindre 10 GeV dans la couronne solaire. Hormis les cas mentionnés ci-dessus, l'énergie des particules dans le vent solaire ou la magnétosphère terrestre est plutôt dans la gamme 100 eV-100 keV. Différents mécanismes sont invoqués pour l'accélération des particules comme le piégeage dans le champ électrique d'ondes de basse fréquence dans les ceintures de radiations (*Sauvaud et al., 2013*), la résonance avec le champ électrique induit par des reconfigurations magnétiques (*Fok et al., 2010 ; Delcourt et al., 2011*) ou la reconnexion magnétique où ions et électrons ont des régimes dynamiques différents (*Aunais et al., 2011*). Dans le cas solaire, la reconnexion magnétique et les nappes de courant qui en résultent sont considérées comme l'ingrédient essentiel de l'accélération et peuvent être diagnostiquées *via* le rayonnement à haute énergie (*Zharkhova et al., 2011*) et en spectro-imagerie radio (*Benz et al., 2011*). L'accélération de Fermi bien connue des astronomes agit dans la queue magnétosphérique (*Nakajima et al., 2012*) et dans les chocs (*Kis et al., 2013*), en

concurrence avec d'autres processus fondés sur des résonances entre mouvement des particules et champ magnétique (*Savoini et al.*, 2010 ; *Yang et al.*, 2011). Dans la zone aurorale de la Terre comme dans le tube de flux Io-Jupiter, les structures cohérentes de champ électrique jouent de concert avec les ondes d'Alfvén pour l'accélération des particules (*Mottez et al.*, 2010 ; *Mottez*, 2012).

#### ☞ Chauffage et particules de haute énergie dans la couronne solaire

Le problème du chauffage de la couronne solaire a été abordé *via* la turbulence MHD anisotrope (*Bigot et al.*, 2010), ce qui a permis pour la première fois de mettre en évidence des lois d'échelle jusqu'ici très controversées (*Grappin et Müller*, 2010). Des études suggèrent notamment un lien entre cette approche turbulente et l'approche topologique utilisée pour l'analyse d'observations de HINODE (*Guglielmino et al.*, 2010) et de simulations MHD 3D d'éruptions coronales (*Pariat et al.*, 2010 ; *Rachmeler et al.*, 2010). Dans les processus de reconnexion d'interchange, l'accélération de particules jusqu'à des énergies relativistes a pu être caractérisée *via* les émissions radio de type III observées à l'aide du radio-héliographe de Nançay, des éjections de masse coronales (CME) étant associées à la grande majorité de ces flux particules énergétiques (*Masson et al.*, 2012). Il apparaît en outre que l'accélération des particules qui s'échappent dans l'espace a lieu également dans la basse couronne, et non pas seulement en amont des CMEs comme cela est souvent supposé (*Klein et al.*, 2011; *Reid et al.*, 2011). Des simulations numériques montrent que les particules accélérées dans la basse couronne où les lignes de champ sont fermées, peuvent se propager le long de lignes ouvertes et éventuellement atteindre l'orbite terrestre où elles sont observées (*Masson et al.*, 2013). Les processus dits d'interchange permettent à ce transfert de s'opérer en moins d'une heure au lieu de plusieurs heures ou quelques jours (*Masson et al.*, 2013).

Bien que des ondes de choc soient fréquemment associées aux éruptions solaires qui s'accompagnent de signatures de particules accélérées à de hautes énergies, elles ne sont pas nécessairement des accélérateurs efficaces. Une étude multi-fréquences détaillée (*Zimovets et al.*, 2012) d'un sursaut radio caractéristique d'une onde de choc dans la basse couronne montre en effet que, malgré sa signature radio exceptionnellement claire, ce choc déclenché par un mouvement rapide de plasma était probablement subcritique.

#### ☞ Accélération dans le choc amont de la Terre

L'accélération des électrons et des ions dans les chocs perpendiculaires a fait l'objet de plusieurs études s'appuyant sur la simulation numérique. Les chocs perpendiculaires sont tels que la direction normale au choc est quasiment perpendiculaire au champ magnétique amont. Si le nombre de Mach est assez grand, le front de ces chocs subit un cycle continu de destruction/reformation tandis qu'une « rampe » se forme en amont de celui-ci. Ainsi, la structure du choc ne cesse de disparaître et de se renouveler, la rampe se substituant peu à peu au front pendant qu'une nouvelle rampe se développe. La fonction de distribution des particules en amont de ces chocs prend une forme très aplatie (« flat top »), avec une queue de distribution en loi de puissance liée au champ électrique résultant de la séparation de charge dans la rampe. Des études récentes montrent qu'une proportion importante des électrons ne se comportent pas de manière adiabatique lors de leur passage dans le choc.

Dans le cas où le plasma en amont est suffisamment froid, ces électrons non-adiabatiques jouent un rôle important, et les fluctuations de la forme du front de choc contribuent à augmenter cette population d'électrons qui peut devenir dominante (*Savoini et Lembège, 2010*). Les fluctuations du front favorisent également la réflexion des ions les plus massifs et peuvent conduire à la formation de faisceaux d'ions quasiment mono-énergétiques (*Yang et al., 2011*). Outre le processus de Fermi généralement invoqué, les simulations mettent également en évidence d'autres mécanismes d'accélération (*Savoini et al., 2010 ; Yang et al., 2011*). Concernant les chocs quasi-parallèles, des observations de CLUSTER montrent que des processus résonants à la gyrofréquence des ions permettent d'accélérer ceux-ci efficacement. Après leur traversée du front du choc, ces ions issus du vent solaire peuvent ensuite subir une accélération supplémentaire de type Fermi (*Kis et al., 2013*).

#### ☞ Accélération et chauffage dans la queue de la magnétosphère

Tirant parti des mesures des satellites THEMIS, plusieurs événements reliant la queue de la magnétosphère et des phénomènes auroraux (observations depuis le sol) ont pu être analysés. Un événement d'électrons énergétiques (1-10 keV) a notamment pu être observé dans la queue proche (à une distance d'environ 11 rayons terrestres) alors que le plasma se déplaçait vers la Terre, simultanément avec des aurores pulsantes au pied des lignes de champ où passaient les satellites THEMIS. Il ressort de cette étude que l'accélération liée à ces aurores s'est produite dans la queue via un processus de Fermi lié au rapprochement des points-miroirs des particules dérivant autour de la Terre. Des études précédentes montraient que la modulation de luminosité des aurores pulsantes était associée à des ondes en mode "siffleur". Ce n'est pas le cas ici et d'autres processus doivent être recherchés, y compris dans des régions éloignées (*Nakajima et al., 2012*). Par ailleurs, des mesures de Double Star ont mis en évidence lors de reconfigurations magnétiques dans la magnétosphère interne (« dipolarisation » associée à un sous-orage) des populations d'électrons avec une large distribution en énergie (« broadband electrons »), populations qui sont plutôt observées dans la queue lointaine. Dans le même temps, le satellite FAST observait des électrons de basse énergie alignés avec le champ magnétique et isotropes à haute énergie. L'analyse de cet événement qui s'est produit lors d'une compression de la magnétosphère et en période d'orage, suggère que deux phénomènes d'accélération distincts se sont produits à des altitudes différentes (*Nakajima et al., 2010*).

#### ☞ Accélération dans la zone aurorale

Les distributions de particules accélérées sont souvent instables (instabilité maser cyclotron), engendrant des émissions radio appelées (dans le cas de la Terre) « Radiations Kilométriques Aurorales » (AKR). Les données de l'instrument RPWS de la sonde Cassini lors de son passage près de la Terre en 1999 ont permis une observation continue sur plusieurs jours de ces émissions. Une modulation de 24 heures a été attribuée à des effets de visibilité liés à la précession du dipôle magnétique terrestre. A l'échelle de quelques heures, les variations de l'AKR sont associées au développement de sous-orages. Une modulation sur 12 heures est également observée. Comme une modulation des indices géomagnétiques a également été observée sur 12 heures, cette modulation semble liée à des causes physiques plutôt qu'à des effets purement géométriques (*Lamy et al., 2010*). On notera enfin que l'accélération des particules par des ondes d'Alfvén semblent jouer un rôle important dans la

formation de structures cohérentes en zone aurorale (*Mottez, 2012*).

#### ☞ Accélération et diffusion dans les ceintures de radiation

Une étude analytique rigoureuse a permis un calcul explicite des coefficients de diffusion radiale des particules pour décrire la dynamique des ceintures de radiation lorsqu'elles sont soumises à des perturbations lentes comme c'est le cas lors des orages magnétiques (*Lejosne et al., 2012, 2013*). Cependant, le rôle des ondes ne peut être négligé dans les phénomènes de diffusion en angle d'attaque et d'accélération des particules de haute énergie ( $> 100$  keV). Les coefficients de diffusion liés aux ondes présentes dans les ceintures de radiation ont été estimés analytiquement sur la base de mesures des satellites CLUSTER. Les modes "siffleurs" (dans des émissions de type « chorus ») accroissent la diffusion en angle d'attaque des électrons dont l'angle d'attaque initial est faible. Du côté jour où ces ondes se propagent avec une forte obliquité par rapport au champ magnétique, elles s'opposent à l'accélération des électrons de fort angle d'attaque mais elles réduisent leur temps de vie dans les ceintures de radiation (*Mourenas, 2012*). Les ondes magnéto-soniques dans la partie basse fréquence du spectre, couplées aux modes siffleurs et au souffle très présents dans les ceintures de radiation, peuvent également conduire à une accélération des électrons et à une réduction de leur temps de vie dans les ceintures (*Mourenas et al., 2013*). Lors des orages magnétiques, des ondes de fréquence encore plus basse (ULF) favorisent l'accélération des électrons de la ceinture de radiation interne, et des protons de la zone située entre ceintures interne et externe. Les mesures de DEMETER montrent que ces structures énergétiques sont surtout visibles au-dessus de l'anomalie Atlantique Sud, en corrélation avec l'observation au sol de pulsations de très longue période de type Pc5 (1000 s) et Pc4 (60 s). L'accélération des particules est due à leur piégeage résonant dans le champ électrique des ondes (*Sauvaud et al., 2013*).

## **2.4. Activité éruptive ou impulsive dans les plasmas**

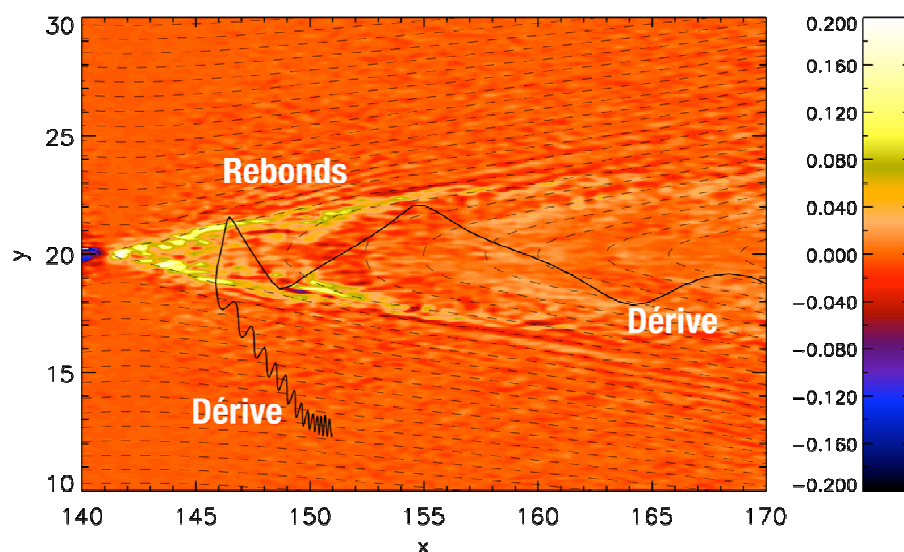
### **2.4.1. Contexte**

Qu'il s'agisse de l'activité solaire et de la physique coronale, ou de la magnétosphère et des orages magnétiques, un mécanisme au cœur des phénomènes explosifs est la reconnexion magnétique, processus par lequel la connectivité des lignes de champ magnétique est brutalement modifiée, entraînant une transformation de l'énergie magnétique en énergie cinétique et en chauffage. La reconnexion magnétique est aujourd'hui un sujet « chaud », tant pour la physique spatiale et astrophysique que pour la physique de laboratoire (la reconnexion pouvant par exemple conduire à des dé-confinements brutaux en fusion magnétique). En physique spatiale, on lui attribue un rôle central dans des phénomènes aussi variés que le chauffage de la couronne solaire ou les orages et sous-orages magnétosphériques (qu'il s'agisse de la Terre ou d'autres planètes magnétisées). En astrophysique, la reconnexion suscite également un intérêt croissant pour comprendre par exemple l'évacuation du moment magnétique des disques d'accrétion pour les étoiles binaires.

### **2.4.2. Résultats marquants**

### 2.4.2.1. Avancées théoriques sur la reconnexion magnétique

Le caractère multi-échelles de la reconnexion magnétique en fait un sujet difficile et loin d'être élucidé, compte tenu de la nature non collisionnelle des milieux où elle se produit le plus souvent. Quand bien même ses causes et conséquences sont à grande échelle, le processus élémentaire à l'origine de la reconnexion est de nature microscopique et échappe donc aux descriptions fluides comme celle fournie par la MHD. Du point de vue numérique, ceci exclut un traitement totalement cinétique pour des raisons de temps de calcul. Plusieurs études ont ainsi été menées pour étudier la frontière entre descriptions fluide et cinétique. L'analyse de simulations hybrides a permis de comprendre la formation de jets de plasma dans le cadre de la reconnexion symétrique non-collisionnelle. Ces jets résultent du mélange de protons rebondissant dans un puits de potentiel divergent formé par l'effet Hall au niveau des séparatrices de la topologie magnétique. Ce mélange structure les fonctions de distribution et, d'un point de vue fluide, apparaît sous la forme d'un tenseur de pression non-gyrotrope dont le gradient s'oppose en partie à l'accélération par la force électrique (Aunai *et al.*, 2011a,b). Du point de vue observationnel, ce mécanisme est confirmé par la mesure de distributions en faisceaux opposés et d'une corrélation entre le tenseur de pression et le champ électromagnétique, ce qui fait office de nouveau proxy de la région de reconnexion dans les données enregistrées dans la queue de la magnétosphère (Aunai *et al.*, 2011c). Du point de vue énergétique, le rôle important de la force de pression se traduit par un transfert de l'énergie magnétique libérée par la reconnexion vers l'énergie thermique des ions (Aunai *et al.*, 2011d). A la magnétopause, les simulations de Aunai *et al.* (2013) ont également permis de comprendre le rôle déterminant du champ guide dans l'établissement du taux de reconnexion asymétrique et d'écartier les effets cinétiques liés aux électrons dans ce processus. Par ailleurs, un modèle théorique d'équilibre cinétique asymétrique a été proposé (Belmont *et al.*, 2011) afin de comprendre la structure interne de la magnétopause, sa stabilité, et surtout d'initialiser les modèles de couches de courant asymétrique dans un état d'équilibre plus réaliste que les équilibres basés sur le résultat de Harris [1962].

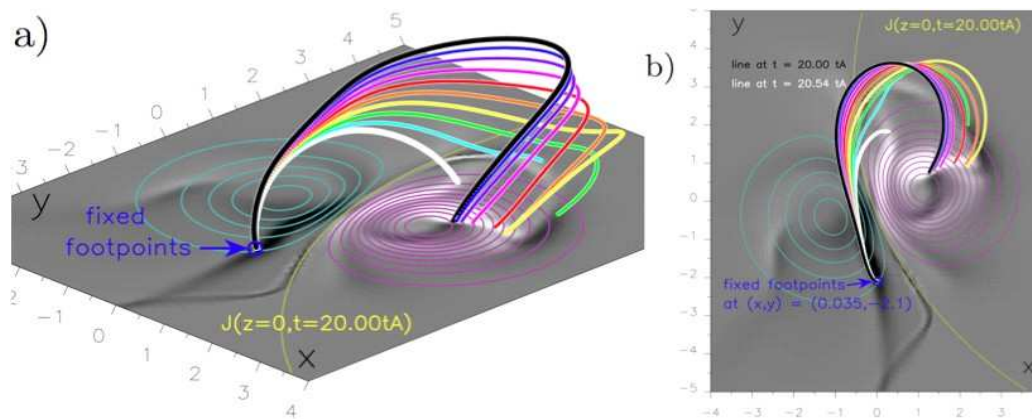


**Figure 2.4.1 :** Trajectoire d'un proton dans une structure de reconnexion. Après avoir pénétré dans la région reconnectée, le proton est réfléchi sur les séparatrices par le champ

électrique de Hall qui s'y trouve. Il est ainsi progressivement accéléré dans la direction X. Les fonctions de distribution des ions et les propriétés fluides s'interprètent bien par la superposition de telles trajectoires individuelles (*Aunai et al.*, 2011).

*Tur et al.* (2010) et *Fruit et al.* (2013) ont étudié comment l'équilibre d'une couche de courant peut être rompu de manière explosive. Pour ce faire, un modèle cinétique de l'interaction résonante entre oscillations de type « ballooning » et mouvement de rebond des électrons piégés dans la couche a été développé. L'état d'équilibre initial est celui d'une couche de Harris modifiée par l'existence d'une composante normale  $B_z$  du champ magnétique, décrivant ainsi la structure 2D de la queue de la magnétosphère terrestre. Après linéarisation, l'équation de Vlasov est résolue pour des fluctuations électromagnétiques de période proche de la période de rebond des électrons (quelques secondes). Le mouvement des électrons est restreint à ses premières composantes de Fourier, ce qui permet un calcul analytique complet des fonctions de distribution perturbées. Dans un premier temps, les travaux ont été restreints aux seules fluctuations électrostatiques. Les résultats obtenus montrent qu'aucun mode électrostatique ne peut exister tant qu'une population froide d'électrons transitoires (non piégés) est présente dans la couche de courant, celle-ci étant alors stable. En revanche, si cette population vient à quitter la structure (par exemple *via* une précipitation dans l'ionosphère) pour n'y laisser que les électrons piégés, une instabilité électrostatique se développe de manière explosive (typiquement, en quelques secondes). Les conditions aux limites - cône de perte notamment - semblent donc jouer un rôle important dans la stabilité de la couche de courant.

Différents travaux utilisant une simulation numérique d'éruption à l'aide du code MHD 3D line-tied visco-résistif OHM (Observationally-driven High-order Mhd) développé au LESIA au début des années 2000 (*Aulanier et al.*, 2010, 2012, 2013 ; *Savcheva et al.*, 2012 ; *Janvier et al.*, 2013) ont par ailleurs été menés pour ré-examiner les propriétés 3D du modèle standard de génération de « flares » et de CMEs. Des progrès significatifs ont été faits concernant les mécanismes de déclenchement de CMEs et conduisent à une vision 3D cohérente de différents phénomènes liés aux éruptions telle la reconnexion « glissante ». Une méthode générale permettant de calculer la distribution spatiale des gradients de connectivité et de localiser les QSLs (Quasi-Separatrix Layers) a été développée (*Pariat et Démoulin*, 2012), et il a été montré que ces QSLs permettent effectivement de localiser les lieux de formation du courant électrique (*Savcheva et al.*, 2012 ; *Janvier et al.*, 2013a). La reconnexion au niveau de ces QSLs induit une dynamique particulière des lignes de champ, celles-ci semblant glisser les unes par rapport aux autres (d'où le terme de reconnexion « glissante ») comme l'a montré une étude détaillée des résultats de simulations numériques avec une haute cadence de sortie (*Masson et al.*, 2012a ; *Janvier et al.*, 2013a). Ceci est illustré dans la figure 2.4.2.



**Figure 2.4.2 :** Mise en évidence du mode de « glissement » dans la reconnexion magnétique 3D. L'évolution d'une ligne de champ donnée au cours de la reconnexion est montrée dans une vue de côté (a) et dans une vue de dessus (b). Les différentes couleurs correspondent à différents instants de l'évolution de cette ligne de champ tracée à partir d'une position fixe dans la polarité négative (iso-contours bleus). Les courants électriques sont représentés en niveaux de gris à la frontière inférieure du domaine de simulation. La ligne de champ traverse rapidement la région de courants forts qui sont présents le long des quasi-séparatrices (Janvier *et al.*, 2013a).

#### 2.4.2.2. Activité éruptive dans l'atmosphère solaire

##### ☞ Emergence du champ magnétique dans l'atmosphère solaire et étude des protubérance

Parmi les phénomènes à l'origine de l'activité éruptive du Soleil et qui jouent notamment un rôle dans les éjections de masse coronale, l'émergence des tubes de flux magnétique à la surface solaire et les protubérances solaires sont d'un intérêt tout particulier. Les régions actives qui émergent à la surface, sont créées dans la zone de convection à l'intérieur du Soleil. Le groupe solaire du CEA à Saclay, en collaboration avec des universités américaines, a utilisé des simulations de dynamo globale pour générer pour la première fois des structures magnétiques flottantes de manière auto-cohérente, ce qui permet d'étudier le processus de génération des taches et leur émergence (Jouve *et al.*, 2013 ; Pinto *et al.*, 2013 ; Nelson *et al.*, 2013a,b). Ces calculs ont été effectués pour un Soleil « jeune » tournant trois fois plus vite que notre Soleil actuel, la prochaine étape étant de les appliquer au cas présent.

Par ailleurs, dans une grande majorité des cas, les protubérances solaires sont impliquées dans les éjections de masse coronale, et il est donc important de comprendre le contexte physique, leur structure et leur formation. Filaments et protubérances ont été étudiés à l'aide d'observations de THEMIS, de la Tour Solaire, de SOHO, SDO, HMI, et à l'aide de simulations numériques (Lopez Ariste *et al.*, 2013 ; Parenti *et al.*, 2013). Parmi les résultats obtenus, il apparaît par exemple qu'il existe une zone de transition protubérance-couronne plus chaude que prévue (Schwartz *et al.*, 2012 ; Gunar *et al.*, 2012 ; Parenti *et al.*, 2012), ou que des ondes transverses identifiées comme des ondes magnéto-sonores rapides se développent (Kucera *et al.*, 2013 ; Schmieder *et al.*, 2013). Les bulles observées dans les protubérances avec des mouvements ascendants pourraient en outre être dues à des bipôles

magnétiques apparaissant dans les couloirs de filaments (*Schmieder et al.*, 2010 ; *Gosain et al.*, 2012 ; *Dudik et al.*, 2012, 2013).

#### ☞ Reconstruction du champ magnétique

L'analyse des données de différents instruments au sol et dans l'espace (THEMIS, HINODE, STEREO, ACE, SDO, RHESSI, IRIS...) couplée à des simulations MHD et à des calculs non-linéaires du champ coronal sans force (approximation « NLFFF ») pour l'étude des éruptions et des CMEs a permis de faire des avancées significatives dans ce domaine. Les cartes de champ magnétique sont nécessaires pour fixer les conditions aux limites des modèles. L'inversion par les codes UNNOFIT-UNNOFIT2 des données THEMIS pour remonter de la polarisation observée au champ magnétique qui l'a créée, intègre désormais l'effet des gradients de vitesse radiale qui dissymétrisent les profils (*Molodij et al.*, 2011). Des exemples de telles cartes sont disponibles à <http://lesia.obspm.fr/perso/veronique-bommier/>. Ces mesures de champ magnétique sur des zones relativement étendues ont permis des reconstructions 3D en champ sans force non linéaire (*Valori et al.*, 2012, 2013 ; *Savcheva et al.*, 2012) ainsi qu'une cartographie plus précise du flux d'hélicité magnétique photosphérique (*Dalmasse et al.*, 2013). A l'aube du développement de télescopes solaires de nouvelle génération (ATST, EST), ces travaux soulignent l'importance de la mesure des champs magnétiques sur des zones étendues (*Molodij et al.*, 2012).

A partir des données de champ magnétique vectoriel de HMI-SDO, il a par ailleurs été montré que la reconstruction de la configuration 3D du champ magnétique lors du déclenchement d'un jet implique l'existence de points nuls (*Guo et al.*, 2013 ; *Schmieder et al.*, 2013). La dynamique de l'atmosphère solaire a par ailleurs été étudiée avec les données issues des missions solaires les plus récentes (*Malherbe et al.*, 2012 ; *Caffau et al.*, 2013), conduisant par exemple à l'obtention de cartes du champ de vitesse des granules pour le Soleil entier à partir des données SDO (*Roudier et al.*, 2012, 2013), à la configuration 3D des flots de matière sur les bords des régions actives (*Harra et al.*, 2012 ; *van Driel-Gesztelyi et al.*, 2012 ; *Démoulin et al.*, 2013), à l'étude de la reconnexion magnétique lors de jets solaires (*Pariat et al.*, 2010) et à celle des processus d'émergence magnétique dans les régions actives (*Vargas Dominguez et al.*, 2012a,b ; *Poisson et al.*, 2013 ; *Jouve et al.*, 2013). D'autres études de reconstruction du champ magnétique utilisant les données de HINODE ont permis de mettre en évidence la présence de TFR (« twisted flux ropes ») dans des régions actives du Soleil (*Canou et al.*, 2010).

#### ☞ Energie des éruptions

Une question importante dans l'étude des phénomènes éruptifs solaires est la quantité totale d'énergie libérée, à la fois parce qu'elle est une contrainte pour les modèles et parce qu'il s'agit d'un paramètre important dans le cadre de la météorologie de l'espace. En d'autres termes, quelle est l'énergie maximale d'une éruption ? L'énergie associée à une éruption est d'abord stockée dans la structure magnétique pré-éruption. Ce paramètre est encore difficilement mesurable et nécessite de modéliser le champ magnétique coronal à partir de magnétogrammes. En couplant des simulations MHD et des observations historiques, *Aulanier et al.* (2013) ont montré que des éruptions plus énergétiques que celles récemment observées ont pu avoir lieu mais que ces événements passés étaient proches du maximum

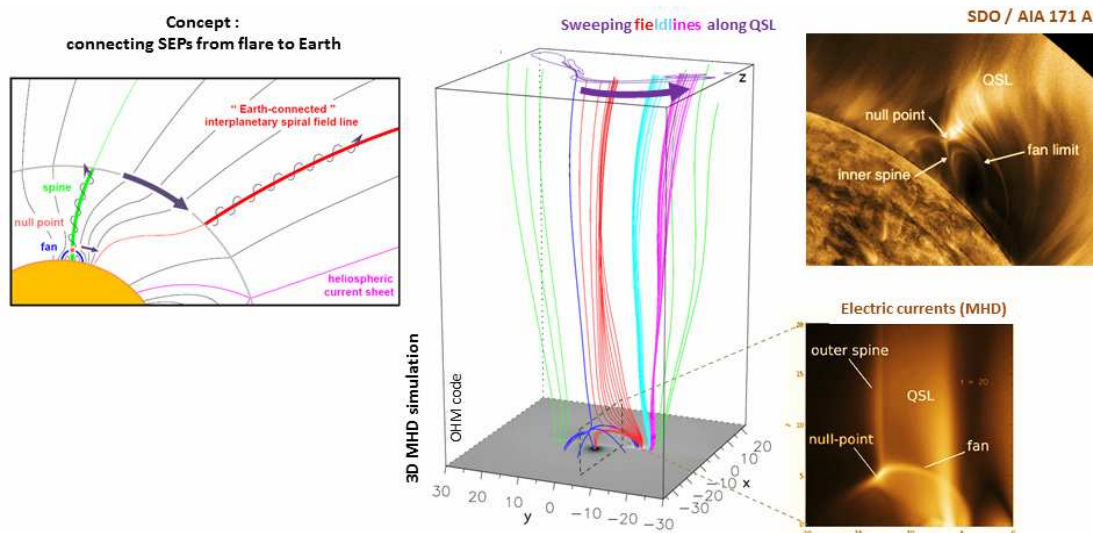


d'énergie théorique. La partie de l'énergie libérée lors d'une éruption et qui nous parvient sous forme lumineuse (énergie radiative) a fait l'objet de plusieurs études (*Kretzschmar et al.*, 2010 ; *Kretzschmar*, 2011) dont il ressort que l'énergie totale rayonnée est plus de 100 fois celle rayonnée dans le domaine X-mou (typiquement entre 0,1 et 0,8 nm) et que le rayonnement visible y contribue très significativement.

#### **2.4.2.3. Activité impulsive dans le milieu interplanétaire**

L'intérêt d'étudier le processus de reconnexion dans le vent solaire vient de la différence d'échelle sur laquelle le processus peut être observé. En effet, l'étude des caractéristiques d'invariance spatiale et temporelle de ce processus au niveau de la magnétopause terrestre est limitée par la taille de la magnétosphère (quelques dizaines de rayons terrestres). *Lavraud et al.* (2009, 2010) ont analysé des données satellites (en particulier STEREO) pour améliorer les contraintes observationnelles sur les modèles de reconnexion magnétique dans le vent solaire. Ces travaux ont mis en évidence l'existence de couches frontières liées au processus de reconnexion ainsi que la cohérence des signatures de reconnexion sur des distances de plus de 1800 rayons terrestres. Hors CME, la présence d'électrons bidirectionnels à proximité des régions d'interaction en corotation (CIRs) était relativement courante (représentant de 15 à 20% des observations). La propagation des CMEs dans le vent solaire constitue un autre sujet d'étude. A cet égard, *Lavraud et al.* (2011) ont montré que la déconnexion des lignes de champ des CME *via* reconnexion magnétique (appelée alors « reconnexion d'interchange ») au pied des lignes de champ dans la couronne solaire se faisait préférentiellement entre CME et trou coronal adjacent à plus haute latitude lors de la phase de croissance de l'activité solaire. Ceci conduit à une érosion des trous coronaux et permet le transport de champ magnétique ouvert nécessaire au renversement cyclique du champ magnétique solaire.

Lors d'événements intenses, le bord d'une CME est détecté en onde radio (Nançay). *Démoulin et al.* (2012) ont montré que la radio CME observée est compatible avec les observations en lumière blanche et avec un modèle de tube de flux torsadé. Les tubes de flux éjectés s'étendent ensuite dans le milieu interplanétaire, et les nuages magnétiques rapides sont reconnectés en amont avec le champ magnétique (*Dasso et al.*, 2006, 2007). A partir de données multi-points provenant des satellites STEREO et ACE, *Ruffenach et al.* (2012) ont également montré l'importance du processus d'érosion des CMEs en cours de transport puisque l'éjection étudiée a perdu plus de 45% du flux magnétique initial au cours de sa propagation entre le Soleil et la Terre.



**Figure 2.4.3 :** Un nouveau modèle pour le transport jusqu'à la Terre de particules solaires énergétiques (SEP) accélérées lors d'éruptions dans la basse couronne. Gauche : comment faire passer les particules d'une ligne de champ non connectée (en vert) à une ligne de champ connectée à la Terre (en rouge) ? Milieu : simulation MHD résistive du chemin créé par la « reconexion d'interchange glissante » se produisant dans une topologie hybride point-nul et Quasi-Separatrix-Layer (QSL). Droite : comparaison entre la distribution des courants électriques obtenus numériquement et les observations AIA dans le domaine EUV.

A l'aide d'observations SDO, de Nançay et de simulations numériques, *Masson et al.* (2012a) ont montré comment le processus de reconexion d'interchange glissante des lignes de champs dans la couronne solaire permet à des particules accélérées loin de lignes de champ connectées à la Terre (donc a priori sans effet sur notre environnement) de passer sur des lignes de champ atteignant la Terre (voir la figure 2.4.3). Les décalages dans les temps d'arrivée de ces particules énergétiques ont été étudiés par *Masson et al.* (2012b).

#### 2.4.2.4. Activité impulsive dans la magnétosphère terrestre

L'énergie transmise par le milieu interplanétaire s'accumule d'abord dans la queue magnétosphérique via la croissance de son système de courant. Elle est ensuite violemment dissipée lorsque le courant à travers la queue se déstabilise, conduisant à une reconfiguration magnétique globale, à des injections de particules vers la Terre et à une éjection de plasma dans la direction opposée au Soleil sur de très grandes distances (jusqu'à plusieurs millions de kilomètres). Ces reconfigurations de la magnétosphère (ou sous-orages) sont interprétées comme résultant soit d'une disruption du courant qui s'écoule dans la queue, soit de la reconexion magnétique. Les causes supposées et conséquences observées des sous-orages ont été étudiées à différentes échelles par une flotte de satellites magnétosphériques (CLUSTER, THEMIS, GEOTAIL, et bientôt MMS).

A partir des mesures CLUSTER à haute résolution temporelle et spatiale lors du sous-orage du 17 août 2003, *Tenerani et al.* (2012a,b) ont mis en évidence l'existence de structures magnétiques non-linéaires à l'échelle des ions, capables de piéger des émissions

intenses d'ondes mode "siffleur" ("whistlers"). La source de ces ondes a pu être reliée à l'anisotropie de température des électrons mesurée à l'intérieur des structures magnétiques, et un chauffage important des électrons dans la direction parallèle au champ magnétique a pu être mis en évidence en relation avec ces structures (*Tenerani et al.*, 2013). Le confinement des ondes mode "siffleur" dans ces structures magnétiques peut conduire à une forte diffusion des électrons dans le cône de perte et donner lieu à des arcs auroraux de petite échelle, dissipant ainsi l'énergie dans l'ionosphère. Les données THEMIS ont également été utilisées pour confirmer le rôle central joué par les ondes mode "siffleur" dit "de cœur" ("whistler chorus mode") dans la création des aurores pulsantes dont l'intensité lumineuse fluctue avec un temps caractéristique allant de 5 à 40 s (*Nishimura et al.*, 2010, 2011). Toujours avec THEMIS, il a été montré que les structures de types « soliton » régulièrement observées dans la queue magnétosphérique pendant les sous-orages n'étaient pas purement électrostatiques mais possédaient une composante du champ magnétique parallèle au champ magnétique ambiant (*Tao et al.*, 2011).

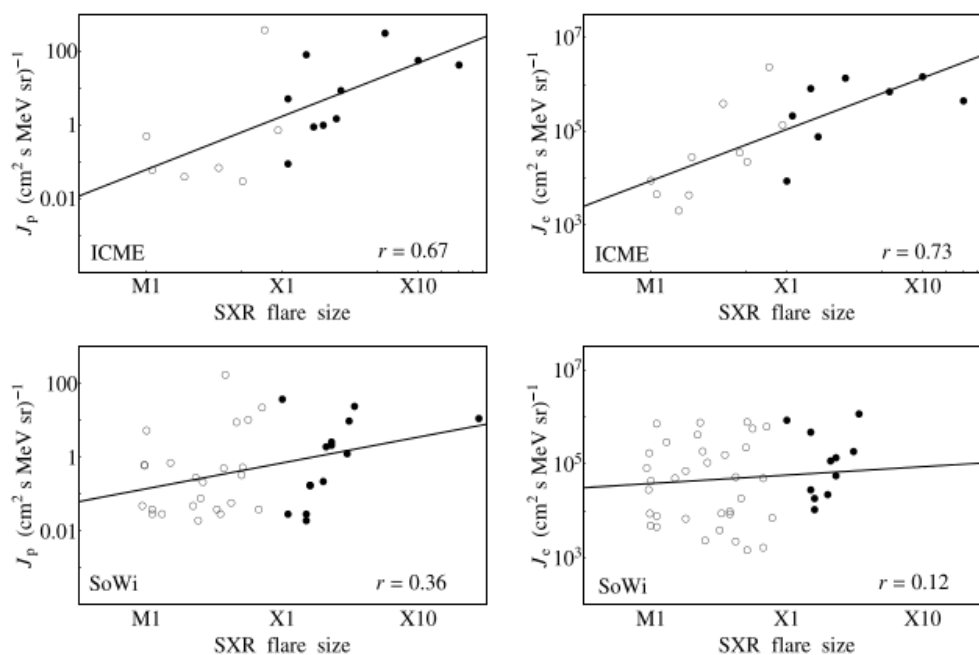
A plus grande échelle, les événements de dipolarisation du champ magnétique ont été analysés de manière statistique par *Palin et al.* (2012). Cette étude montre que, dans de nombreux cas, les dipolarisations ne sont pas associées à des sous-orages mais plutôt à une intensification des arcs auroraux et des perturbations magnétiques au sol, phénomènes qui vont de pair avec un épaississement de la couche de courant. La réduction (disruption) du courant dans la couche de plasma lors d'un sous-orage a été étudiée dans une étude combinant observations et simulations PIC (*Sauvaud et al.*, 2012). Il ressort de cette étude que le champ électrique accompagnant les disruptions de courant peut être mesuré dans les lobes à partir de la vitesse de dérive des faisceaux d'oxygène. Une comparaison avec les simulations numériques suggère que les perturbations magnétiques dans les lobes sont la signature d'un déplacement vers la queue de la ligne neutre associée à la disruption de courant. Ces disruptions peuvent être associées à des ondes d'Alfvén se propageant loin dans les lobes et à grande vitesse (jusqu'à 1800 km/s), comme le suggèrent des observations de STEREO-B dans la queue magnétosphérique à une distance de ~255 rayons terrestres (*Sauvaud et al.*, 2011).

## 2.5. Météorologie de l'espace

L'ensemble des études menées au sein du PNST est pertinent pour la météorologie de l'espace qui est le volet « science appliquée » de notre discipline, orienté vers les besoins sociétaux. On se propose ici de faire le point sur quelques faits marquants dans ce domaine, ainsi que sur les moyens et méthodes nécessaires pour assurer un passage structuré de la recherche fondamentale aux applications opérationnelles.

### 2.5.1. Avancées dans la compréhension des phénomènes physiques

☞ Origine des événements à particules dans les structures interplanétaires transitoires



**Figure 2.5.1 :** (haut) Les événements détectés dans les CMEs présentent une bonne corrélation entre intensité de particules (électrons à droite et protons à gauche) mesurées à la Terre et flux du rayonnement X dans la couronne. (bas) Cette corrélation est faible pour les événements observés dans le vent solaire standard (Miteva *et al.*, 2013).

Une étude statistique sur les relations entre les événements à particules détectés près de la Terre et les éruptions et éjections de masse a été menée (Miteva *et al.*, 2013). Cette étude montre que, pour une fraction significative (environ 20%) des événements à particules, qu'elles soient relativistes ou non, la configuration magnétique du milieu interplanétaire est perturbée par des CMEs. Un résultat surprenant de cette étude est que les événements détectés dans les CMEs présentent une bonne corrélation entre intensité des particules (électrons et protons) mesurées à la Terre et flux du rayonnement X dans la couronne (voir la figure 2.5.1). A contrario, cette corrélation est faible pour les événements observés dans le vent solaire standard. Une meilleure connexion magnétique avec la région accélératrice au niveau du Soleil dans le cas des événements avec CMEs pourrait être à l'origine de ce phénomène, qui est important pour la météorologie de l'espace puisque les émissions solaires pourraient ainsi servir dans la prévision des événements à particules.

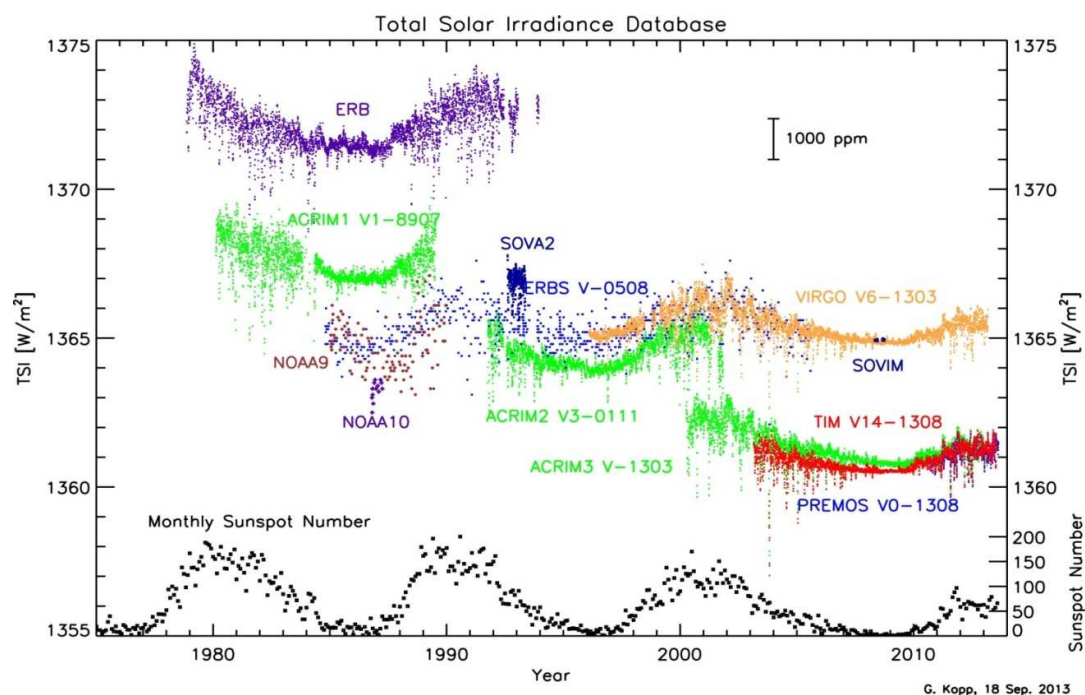
#### ☞ Premières observations de la propagation d'une CME à l'aide de STEREO

La « géo-effectivité » (ou intensité de l'impact sur l'environnement terrestre) des CMEs dépend d'un ensemble de facteurs incluant les conditions proches du Soleil, les processus à l'œuvre lors de la propagation dans l'héliosphère et les propriétés dynamiques de la magnétosphère. Un groupe de travail multi-disciplinaire (Groupe multi-instruments GMI-2) rassemblant une quinzaine de chercheurs de laboratoires nationaux (IRAP, IAS, LATMOS, LESIA, LPC2E, IPAG, LPP, IPGP) ou étrangers a été mis en place sous l'impulsion de K. Bocchialini (IAS) et M. Menvielle (LATMOS) avec pour objectif premier l'étude des propriétés et des conditions de propagation des CMEs entre le Soleil et la Terre pour caractériser leur « géo-effectivité ». Une telle étude est basée sur l'analyse simultanée

d'observations variées (SOHO, CLUSTER, RHESSI, GEOS, ACE, SuperDARN,...) et couvre l'évolution des CMEs depuis leur origine au niveau du Soleil jusqu'à l'environnement proche de la Terre (ionosphère et thermosphère). Dès 2010, un premier travail a permis d'établir une base de données de paramètres caractérisant ces événements afin de permettre non seulement des études de cas mais aussi une approche statistique pour le développement d'outils de prévision. GMI-2 a rassemblé les propriétés des CMEs halos détectées par SoHO d'Avril 1996 à Janvier 2007, ainsi que les observations des événements qui leur sont associés dans le vent solaire et l'environnement terrestre. Ce groupe de travail a construit une base de données à partir des paramètres et observations ainsi collectés. A partir de la liste des CMEs halos de 2002 (étendue aux CMEs partielles), le groupe a déterminé la liste d'événements associés à L1 dont la source solaire est définie sans ambiguïté.

#### *☞ Contribution de PICARD au suivi de l'éclairement solaire total*

Le rayonnement solaire, première source d'énergie sur Terre, est constitué de l'ensemble du spectre électromagnétique, du rayonnement X aux ondes radio. Ce spectre solaire varie avec des amplitudes différentes selon le domaine spectral considéré et influe sur le système Terre-atmosphère. L'éclairement solaire total (TSI) est la quantité d'énergie radiative provenant du Soleil reçue par une surface de 1 m<sup>2</sup> au sommet de l'atmosphère terrestre. Cet éclairement solaire total est une donnée essentielle pour tous les modèles climatiques. La TSI est mesurée en orbite depuis 1978 (voir la figure 2.5.2). Elle est aussi modélisée à l'aide des surfaces de taches et facules, et de leur position par rapport à la direction Soleil-Terre. En utilisant les observations visuelles et photographiques antérieures à 1978, une reconstitution historique de la TSI peut être entreprise et utilisée pour les modèles climatiques. D'autres méthodes existent également qui utilisent la durée du cycle solaire ou les variations de concentration des isotopes cosmogéniques, mais ces reconstructions diffèrent à certaines périodes et des critiques peuvent être formulées concernant l'utilisation des divers proxys de l'irradiance. Pour étudier la variabilité de la TSI sur le long terme et valider un modèle climatique pour ces périodes, une bonne inter-calibration des instruments et la valeur absolue de la TSI sont nécessaires. A l'aide de mesures collectées à partir de différents instruments spatiaux au cours des 35 dernières années, la valeur absolue de la TSI a progressivement diminué, passant de ~1371 W.m<sup>-2</sup> en 1978 à ~1362 W.m<sup>-2</sup> en 2013 (valeur représentative à partir d'un minimum solaire). Cette évolution semble néanmoins être due essentiellement à des « offsets » dans les calibrations des différents instruments, offsets plus ou moins bien compris ou modélisés (voir la figure 2.5.3).



**Figure 2.5.2 :** Mesures de la TSI par les différentes missions spatiales depuis 35 ans. Les « offsets » entre les différentes missions résultent de différences de calibration non résolues. Les premiers résultats de l'instrument SORCE/TIM ont fourni une valeur inférieure (d'environ 0,35%) à celles des autres instruments en vol, ce qui est maintenant confirmé par les deux instruments de PICARD : PREMOS (montré ici) et SOVAP (voir G. Kopp, <http://spot.colorado.edu/~kopp/TSI/>).

L'instrument TIM (Total Irradiance Monitor) de la mission SORCE (Solar Radiation and Climate Experiment) a mesuré une TSI proche de  $1361 \text{ W.m}^{-2}$  (Kopp et al., 2004 ; Kopp et Lean, 2011), mesure inférieure d'environ  $4,5 \text{ W.m}^{-2}$  à celles réalisées par les autres radiomètres spatiaux en service à la même période (ACRIM 3/ACRIMSAT, DIARAD / VIRGO, PMO6 V / VIRGO). Suite à ce résultat, une installation au sol (TRF, TSI Radiometer Facility) a été réalisée par l'équipe de TIM pour comparer et mieux comprendre la calibration des instruments. Cet outil a conduit l'équipe d'ACRIM3 à réviser à la baisse sa valeur absolue de la TSI, laquelle est maintenant en accord avec TIM. Cette valeur plus basse de la TSI a récemment été confirmée par deux instruments de PICARD (Schmutz et al., 2013 ; Meftah et al., 2013), ce qui constitue un résultat important de l'instrument PREMOS à bord de PICARD et valide la calibration effectuée avant le vol.

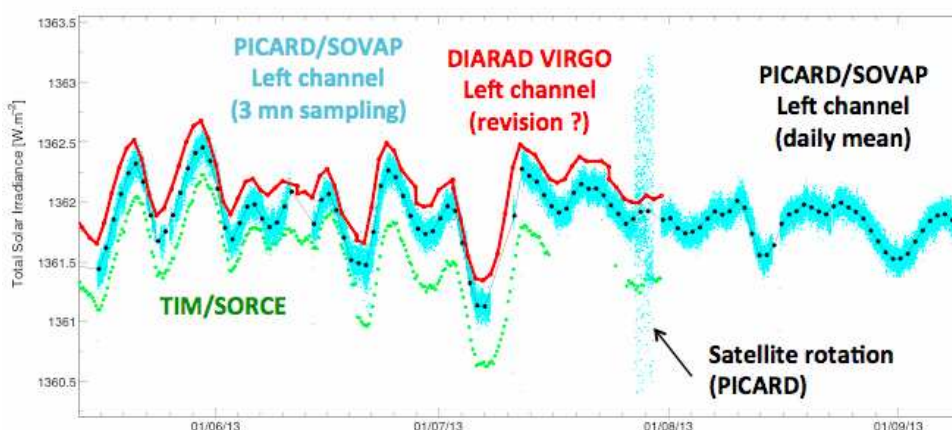


Figure 2.5.3: Evolution de la TSI depuis mai 2013.

La détermination de la TSI à l'aide de l'instrument SOVAP à bord de PICARD a, pour sa part, exigé la mise en place d'une nouvelle équation instrumentale. Un nouveau paramètre a été intégré à partir d'une analyse théorique qui met en évidence la non-équivalence thermo-électrique de la cavité radiométrique. Dans cette nouvelle approche, les équipes du LATMOS et du RMIB ont obtenu une valeur absolue de la TSI qui est inférieure à celle fournie précédemment par des radiomètres de même type. Basé sur les données de l'instrument SOVAP, *Meftah et al.* (2013) ont obtenu une valeur absolue de la TSI de  $1362,1 \text{ W.m}^{-2}$  (voir la figure 2.5.3). La figure 2.5.4 montre la variabilité de la TSI mesurée au cours de l'année 2011 par TIM (SORCE), PREMOS et SOVAP (PICARD). A l'exception d'effets transitoires lors d'interruptions de mesures de SOVAP, l'accord est excellent entre les trois instruments.

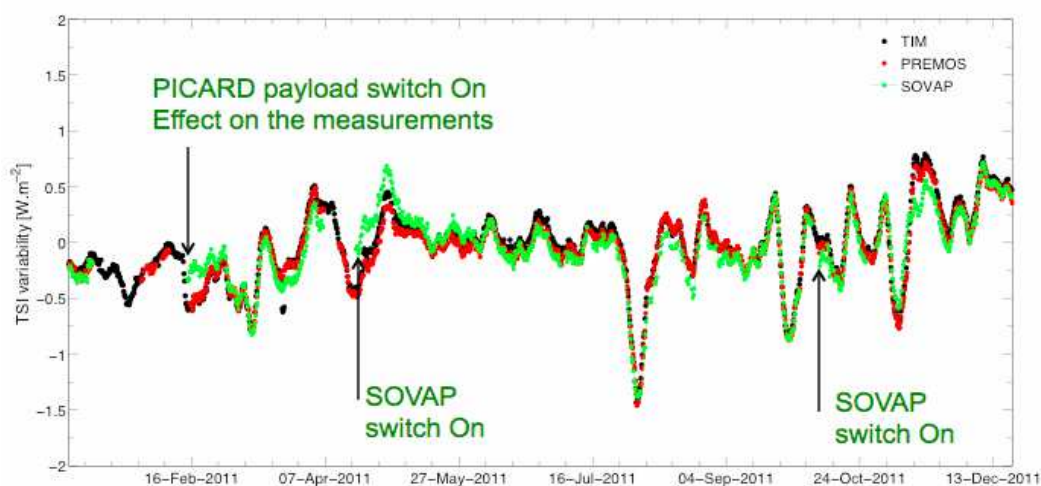


Figure 2.5.4 : Analyse de la variabilité de trois radiomètres spatiaux au cours de l'année 2011 (*Meftah et al.*, 2013).

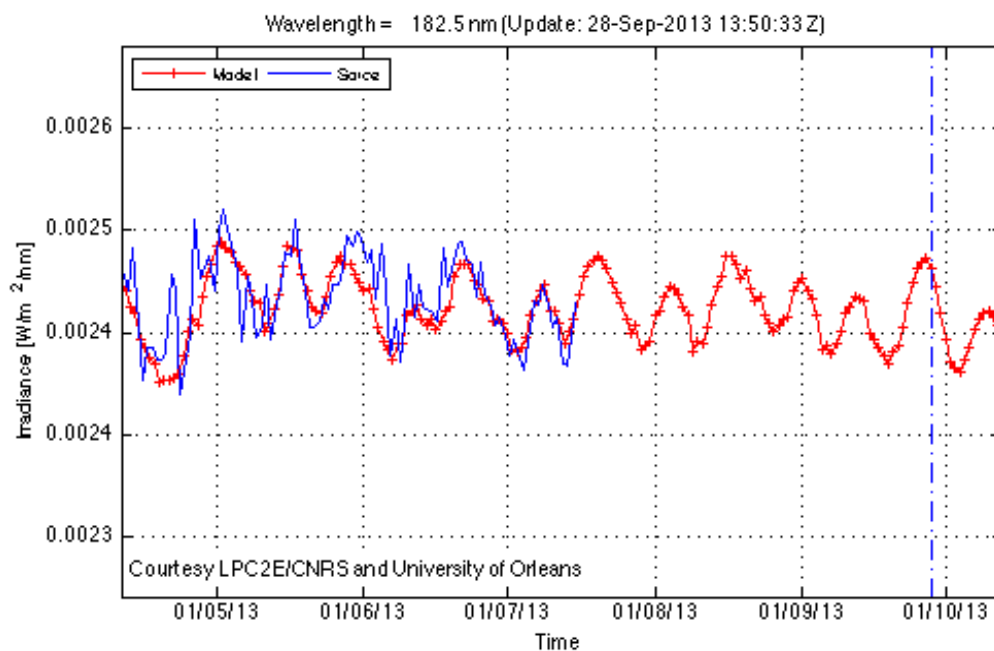
Il est à noter également ici que le LPC2E est fortement impliqué dans cette recherche au niveau européen via l'action COST TOSCA « *Towards a more complete assessment of the impact of solar variability on Earth climate* » (T. Dudok de Wit, coordinateur) et un nouveau projet européen intitulé SOLID (« *first european comprehensive SOLAR Irradiance Data exploitation* ») qui vise à reconstruire l'irradiance solaire spectrale sur les décennies

passées. Ces activités démontrent que le suivi de l'irradiance solaire totale est important pour l'étude des relations Soleil-climat et motive fortement la communauté nationale, contrairement à ce qui a été avancé par le comité TOSCA du CNES lors de la décision de l'arrêt officiel des opérations scientifiques de PICARD.

### 2.5.2. Avancées dans les applications en météorologie de l'espace

#### ☞ Production en temps réel du spectre solaire et prévisions

L'irradiance solaire dans l'UV et l'extrême UV (EUV) est d'une importance primordiale pour contraindre les modèles du système thermosphère-ionosphère, le forçage du climat et les applications de météorologie de l'espace. Depuis janvier 2011, l'équipe du LPC2E produit en temps réel des spectres solaires depuis l'extrême UV jusqu'au proche IR en utilisant les magnétogrammes de SDO. Ces spectres sont mis à jour toutes les trois heures. Ils sont obtenus par segmentations des magnétogrammes de HMI en régions d'intensités différentes, puis en reconstruisant la contribution de chacune de ces régions à la variabilité spectrale en prenant en compte leurs positions sur le Soleil. La reconstruction s'effectue en utilisant un réseau de neurones artificiels (voir la figure 2.5.5). Dans le domaine UV/EUV, le modèle est contraint par comparaison avec les observations des instruments du satellite SORCE. Ce modèle permet non seulement une estimation en temps réel du spectre mais aussi une prévision plusieurs jours à l'avance, ouvrant ainsi des perspectives pour une meilleure compréhension des contributions aux variations de l'irradiance spectrale.



**Figure 2.5.5 :** Exemple de reconstruction et prévision de l'irradiance spectrale à 182,5 nm et comparaison avec les observations SORCE. La ligne verticale bleue indique l'instant de la dernière mise à jour sur le site <http://lpc2e.cnrs-orleans.fr/~soteria>.

Dans le cadre de différents projets européen (SOTERIA, ATMOP) le LPC2E a par ailleurs développé une base de données de proxys solaires (*Dudok de Wit*, 2011) et a étudié



les variations de l'irradiance solaire dans le domaine EUV (*Dudok de Wit et Bruinsma*, 2011 ; *Kretzschmar et al.*, 2012a,b ; *Raulin et al.*, 2012 ; *Dominique et al.*, 2013). De nouvelles stratégies d'observation dans le cadre de la météorologie de l'espace ont également été étudiées (*Cessateur et al.*, 2011, 2012).

#### ☞ Production de nouveaux indices géomagnétiques et prévisions des indices am

De nouveaux indices géomagnétiques ont été développés dans le cadre du projet Européen ATMOP (2011-2013) à partir de la vingtaine de stations du réseau des indices am. Il s'agit ici d'indices tri-horaires calculés sur 4 secteurs de temps géomagnétique local (MLT), et d'indices de résolution temporelle plus grande (jusqu'à 15 min). Une étude statistique des indices sectoriels (en MLT) sur 4 cycles solaires a mis en évidence leur comportement spécifique, les indices du secteur diurne étant plus faibles que ceux du secteur nocturne. Ils ont aussi permis de dissocier, lors de deux cas d'orages, les effets associés au couplage vent solaire-magnétosphère côté jour (reconnexion magnétique et augmentation brutale de pression) de ceux associés aux sous-orages et à l'intensification de l'anneau de courant dans les secteurs soir et nuit (*Chambodut et al.*, 2013). Les valeurs Quicklook des indices historiques aa et am sont calculées et mises à disposition en routine via le site du Service International des Indices Géomagnétiques (SIIG) actuellement hébergé par le LATMOS. Ces indices, ainsi que les nouveaux indices, seront calculés dans un proche avenir par un nouveau logiciel en cours d'installation à l'EOST (Strasbourg) où le SIIG est en cours de transfert (voir §4.3.5). Un prototype de prédiction des indices am a également été développé dans le cadre du projet ATMOP. Il utilise un réseau de neurones avec en entrée les données du champ magnétique interplanétaire et du vent solaire mesurés en L1. Les premiers résultats obtenus à l'aide de ce prototype sont très encourageants.

#### ☞ Accès aux données et valeur ajoutée via l'observatoire virtuel

Des outils utiles pour la météorologie de l'espace sont déjà en place ou en cours de développement dans le cadre des centres de données (voir §4.3). Il apparaît néanmoins que le développement d'outils spécifiques est nécessaire pour franchir une étape supplémentaire dans l'accès aux données (non seulement celles des instruments français mais aussi celles issues de la communauté internationale). Ces dernières années ont été marquées par une avancée substantielle dans ce domaine grâce au développement de l'observatoire virtuel HELIO (Heliophysics Integrated Observatory) dans le cadre du programme européen e-infrastructure du FP7 (2009-2012) (<http://www.helio-vo.eu>) auxquels sont associés l'IRAP, l'IAS et le LESIA. Toujours dans le cadre des projets soutenus par le FP7, la communauté française est impliquée dans le développement d'un serveur dédié à l'étude des particules solaires énergétiques (SEP) et de leur origine ([www.sepsserver.eu](http://www.sepsserver.eu)). Comme pour l'observatoire virtuel, l'objectif est ici de rassembler en un seul portail les données de plusieurs instruments spatiaux et sol (dont le NRH) et d'apporter une valeur ajoutée en fournissant des outils d'analyse des signatures SEP et électromagnétiques des particules accélérées. Les données des moniteurs à neutron (Terre Adélie et Iles Kerguelen) sont en outre intégrées dans la base NMDB <http://www.nmdb.eu/?q=node/57> et accessibles via le portail ESA SSA <http://swe.ssa.esa.int/web/guest/space-radiation>.

#### ☞ Fourniture de services à des utilisateurs en dehors de la recherche

En plus des activités de recherche en amont, les laboratoires du PNST participent à des opérations de météorologie de l'espace menées par des organismes en dehors de la recherche. Ainsi, le projet FEDOME est un démonstrateur de météorologie de l'espace de l'Armée de l'Air. La communauté du PNST fournit des données et de l'expertise pour leur interprétation. Elle a aussi assuré des formations spécifiques. Les données sont soit celles de la diffusion habituelle tels les spectro-héliogrammes de Meudon ou les observations de surveillance CLIMSO du Pic du Midi, soit pré-traitées pour les besoins de FEDOME comme les spectres et images radio des instruments de Nançay. Dans le cadre de ce projet, l'Armée de l'Air a financé le récepteur du spectrographe ORFEES (Observations Radio pour FEDOME et l'Etude des Eruptions Solaires) qui est en service depuis 2012 à la station de radioastronomie de Nançay, fournissant des observations pour la recherche et pour le service FEDOME.

Le projet SIEVERT assure depuis plusieurs années la surveillance des doses de radiation reçues par le personnel navigant de l'aviation civile en France (surveillance obligatoire selon une directive européenne et la loi française). La source principale de radiations aux altitudes de vol est le rayonnement cosmique dont la surveillance repose sur les mesures des moniteurs à neutrons. Le rayonnement cosmique a une origine galactique, et son intensité à la Terre est modulée par le champ magnétique héliosphérique. Une partie (sporadique) de ce rayonnement provient des rares éruptions solaires produisant un flux important de nucléons ou noyaux relativistes. Un modèle empirique basé sur les mesures du moniteur à neutrons des Iles Kerguelen est utilisé pour estimer les doses supplémentaires. Compte tenu des doses faibles, SIEVERT assure la surveillance mais n'émet pas d'alertes pour des événements à venir. L'opération est menée conjointement avec l'aviation civile, l'IRSN (Institut de Radioprotection et Sûreté Nucléaire) et l'Observatoire de Paris (LESIA). Les moniteurs à neutrons français sont sous la responsabilité technique de l'IPEV (Institut polaire Paul-Emile Victor).

Parmi les activités menées dans les dernières années, notons enfin :

- l'initiative « Journal of Space Weather and Space Climate » qui se développe depuis 2011 avec une forte implication française (fondateur et co-éditeur en chef : J. Liliensten, IPAG)
- les écoles d'été dans le Maghreb (co-organisées par C. Amory, LPP)
- le forum organisé en novembre 2012 pour faire le point sur les activités météo de l'espace en France (T. Dudok de Wit, LPC2E ; D. Delcourt, LPP)
- l'initiative Labex ESEP (Exploration Spatiale des Environnements Planétaires)
- l'axe transverse "météorologie de l'espace et suivi d'objets géocroiseurs" (ESTERS : Environnement Spatial de la TERre : Recherche et Surveillance) à l'Observatoire de Paris dans le cadre du programme quinquennal 2013-2016
- le lien des services d'observation du système Soleil-Terre labellisées (SO6) avec la météorologie de l'espace.

Plusieurs autres projets sont menés dans le cadre d'études en météorologie de l'espace et sont susceptibles de contribuer dans l'avenir à des activités opérationnelles, à savoir :

- la cartographie magnétique des régions solaires actives
- l'assimilation des données couplée à des modèles dynamo pour la prévision de l'activité solaire

- l'étude des filaments et leur détection automatique sur les images de SDO et les images H $\alpha$
- la détection automatisée de sursauts dans des spectres radio
- la caractérisation de l'ionosphère polaire avec EISCAT 3D
- la caractérisation de la thermosphère avec le photopolarimètre SPP (Steerable Polarization Photometer)
- le couplage des modèles LMDZ et TRANSCAR pour l'étude du système magnétosphère-ionosphère-thermosphère.

## 2.6. Perspectives

### 2.6.1. Couplage entre les différentes enveloppes de plasma

#### ☞ Enveloppe solaire et vent solaire

Dans les années à venir, l'obtention de modèles de dynamo solaire 3D couplant la zone radiative, l'enveloppe convective et la chromosphère seront nécessaires afin de mieux prendre en compte des processus physiques tels que pénétration convective, pompage magnétique, excitation et propagation d'ondes, rotation des couches superficielles, transport d'énergie, d'impulsion et de moment cinétique. Le développement de modèle de vent 3D utilisant soit des sorties de simulations numériques de convection-dynamo soit des cartes de champ magnétique réalistes permettra l'étude des composantes rapide et lente du vent solaire ainsi que leur évolution spatio-temporelle.

#### ☞ Vent solaire et magnétosphères

Avec plus de 1000 systèmes exo-planétaires aujourd'hui découverts, l'étude comparée de l'interaction vent stellaire-magnétosphères est en plein essor, et la grande diversité des paramètres orbitaux, magnétiques, stellaires et planétaires permettra d'explorer en détails les processus physiques en jeu. Plusieurs études de l'interaction entre le vent solaire et d'autres planètes ont été menées récemment, incluant Jupiter (observations radio de Nançay-DAM et Cassini-RPWS et mesures magnétiques de Cassini) (*Hess et al.*, 2012) et Uranus (suivi multi-instrument et propagation MHD de chocs interplanétaires impactant successivement la Terre, Jupiter et Uranus) (*Lamy et al.*, 2012).

#### ☞ Magnétosphère-ionosphère-thermosphère

A l'instar de CLUSTER, la mission américaine MMS (« Magnetospheric Multiscale ») qui sera lancée en 2015 est composée de quatre satellites. Ceux-ci permettront une étude multi-points détaillée de processus fondamentaux comme la reconnexion magnétique, l'accélération des particules, et le rôle de la turbulence. La mission spatiale TARANIS du CNES (lancement prévu en 2015) apportera un éclairage nouveau sur le couplage magnétosphère – ionosphère, concernant notamment le taux d'occurrence des événements lumineux transitoires (TLE) et les faisceaux d'électrons accélérés de l'atmosphère vers la magnétosphère (« runaway electrons »). TARANIS permettra également de mieux comprendre le rôle des électrons précipités dans le couplage entre magnétosphère et

atmosphère. Les projets ALFVEN et TOR-NG (respectivement dédiés aux mécanismes d'accélération en zone aurorale et à la dissipation de la turbulence) seront par ailleurs repropoés. Citons également le projet NITRO proposé dans le cadre de la prospective CNES et qui vise à comprendre les mécanismes d'échappement de l'azote des atmosphères planétaires.

### **2.6.2. Transport d'énergie multi-échelles et turbulence**

Les récentes découvertes observationnelles et théoriques sur la thématique « transfert et dynamique turbulente » posent de nouvelles questions en physique des plasmas et suscitent ainsi de nouvelles directions de recherche. Parmi celles-ci, on peut citer :

#### ☞ *Quels sont les mécanismes de micro-chauffage coronal ?*

Il existe plusieurs modèles de chauffage pour la couronne solaire (reconnexion, cinétique, turbulence...) et, de fait, il est probable que plusieurs mécanismes opèrent simultanément. Parmi les pistes envisagées, citons le chauffage dû à la filamentation d'ondes d'Alfven et le rôle des micro-instabilités. Une question importante porte donc sur l'articulation entre ces différents mécanismes, en considérant en particulier un vaste domaine d'échelles spatiales et temporelles. Une modélisation numérique fine incluant des prédictions de spectres de raies synthétiques ainsi que des observations à très haute résolution seront nécessaires pour répondre à cette question.

#### ☞ *Quelle est l'origine du chauffage local dans le vent solaire ?*

Les mécanismes qui conduisent au chauffage local dans le vent solaire restent à élucider. Ce sujet est important car les mesures *in situ* montrent que la température des protons du plasma héliosphérique diminue moins rapidement que ce que prévoit une expansion adiabatique. En effet, le profil observé varie comme  $R^{-0.9}$  ( $R$  étant la distance héliocentrique) et non pas comme  $R^{-4/3}$  dans le cas adiabatique. L'utilisation d'une loi exacte de la turbulence a permis de déduire de manière observationnelle le taux moyen de dissipation d'énergie. Il reste à connaître le mécanisme qui *in fine* permet ce chauffage. La question sous-jacente est : à quelles échelles se produit le chauffage ?

#### ☞ *Quel est le rôle des effets dispersifs dans le régime de turbulence ?*

La turbulence d'ondes dispersives interagissant faiblement possède des caractéristiques analogues à la turbulence d'un fluide régie par la phénoménologie de Kolmogorov, avec en particulier le développement de cascades pour les quantités conservées. Dans le cas d'une turbulence forte, les effets dispersifs peuvent être à l'origine d'une modification importante de cette phénoménologie, et en particulier conduire à un transfert d'énergie intermittent et à la perte d'universalité (liée à une dépendance des propriétés des grandes échelles par rapport aux propriétés de la zone de dissipation). Il est donc nécessaire de décrire la turbulence forte dans des régimes où les structures cohérentes peuvent jouer un rôle important. A moyen terme, il est prévu de compléter les études observationnelles en analysant les données « particules » pour rechercher les signatures de chauffage et/ou d'accélération et de tester ainsi les scénarii de dissipation (effet Landau, reconnexion dans les couches de courant...).

Ceci est opportun avec l'arrivée prochaine des données à très haute résolution temporelle (~ quelques ms) de la mission MMS.

☞ Comment se termine la cascade d'énergie vers les petites échelles ?

Cette question est en partie reliée à la première dans la mesure où l'on s'attend à ce qu'une partie du chauffage provienne des plus petites échelles (celles au-delà de la dernière zone inertielle). En d'autres termes, le spectre observé sur les échelles électroniques correspond-il à la dissipation finale de la turbulence ou sommes-nous confrontés à un troisième régime de turbulence ? Dans le premier cas, on peut évoquer par exemple l'apparition d'effets électrostatiques comme des doubles couches. Sur le plan théorique, l'exploitation en cours du code 3D Landau-fluide (qui permet de prendre en compte des effets cinétiques importants comme l'effet Landau) devrait permettre de mieux explorer la transition de la cascade turbulente des échelles MHD aux échelles cinétiques.

☞ Quel est le rôle des effets compressibles sur la dynamique du vent solaire ?

Les travaux les plus récents basés sur des données d'ULYSSE et sur la théorie de Kolmogorov (« loi des 4/3 »), incluant éventuellement un champ magnétique moyen, démontrent que les fluctuations compressibles aux grandes échelles (donc aux basses fréquences) ont un rôle important à jouer, et ce malgré leurs faibles amplitudes. La prise en compte de ces fluctuations compressibles est également essentielle pour l'estimation du taux moyen de dissipation d'énergie et donc du chauffage turbulent. Une étude observationnelle poussée permettra de quantifier ces effets compressibles qui ont été jusqu'à maintenant négligés.

☞ Peut-on remonter aux propriétés 3D du vent à 1 UA ?

CLUSTER a permis pour la première fois de remonter à une information 3D en nombre d'onde sur le spectre turbulent au niveau de la magnétogaine. Ces mesures révèlent des différences avec les indices des lois de puissance de ces mêmes spectres mesurés en fréquence. Cette information est essentielle dans le cas du vent solaire où l'hypothèse de Taylor pose problème au-delà de 1 Hz et où l'écart à l'isotropie est important à toutes les échelles. Les incursions de CLUSTER dans le vent solaire sont une occasion unique pour mener cette analyse. Un tournant important pour la communauté est l'utilisation d'un simulateur spatial permettant de reproduire des multi-satellites « virtuels » en se rapprochant des conditions expérimentales réelles (telles CLUSTER ou à l'avenir MMS) via le CDPP. Ceci devrait permettre une comparaison optimale avec les mesures *in situ* et de combiner les résultats avec des simulations numériques multi-dimensionnelles auto-cohérentes pour l'étude des chocs. Une autre application pourrait être l'interaction vent solaire-magnétosphère.

☞ Comment évolue l'anisotropie aux petites échelles ?

De nombreuses observations indiquent que le vent solaire est anisotrope aux grandes échelles (MHD). Ce qui se passe aux petites échelles (essentiellement aux fréquences supérieures à 1 Hz) est moins bien compris. En particulier, l'anisotropie se renforce-t-elle ou

disparaît-elle ? Ce point est important dans la mesure où le degré d'anisotropie détermine l'interprétation des observations. Une question largement débattue actuellement porte sur le type de fluctuations rencontrées aux hautes fréquences, à savoir : fluctuations de type onde d'Alfvén cinétique ou de type « siffleur ».

### **2.6.3. Mécanismes d'accélération et de chauffage du plasma**

La mission SOLAR ORBITER de l'ESA sera un pas en avant significatif dans un domaine où l'Héliosphère est clairement un laboratoire pour l'astrophysique, à savoir : la mesure *in situ* des particules de haute énergie près du Soleil où leurs propriétés sont moins altérées par le transport interplanétaire qu'à 1 UA. Par des observations d'ondes de choc près du Soleil, avec les populations de particules et ondes associées, et la combinaison entre mesures *in situ* et télédétection à bord (ondes radio, rayons X durs, spectro-imagerie du plasma de la couronne) et au sol, la mission SOLAR ORBITER fournira des données inédites sur la manière dont les différents accélérateurs – la reconnexion dans les régions éruptives de la basse couronne et l'onde de choc d'une éjection de masse dans la haute couronne – contribuent aux différentes espèces de particules de haute énergie. La préparation de cette mission et de son exploitation sera un élément fédérateur fort pour la communauté PNST dans les années à venir.

Concernant l'accélération du vent solaire, la sonde SOLAR PROBE PLUS de la NASA qui sera lancée en 2018, devrait permettre des avancées importantes. En effet, cette sonde avec une orbite très elliptique dans le vent solaire s'approchera à 9,5 rayons solaires de notre étoile, c'est-à-dire à proximité de la région d'accélération. En outre, pour la première fois, la sonde franchira vraisemblablement le point alfvénique, lieu où le vent solaire devient supersonique et super-alfvénique. A l'exception des mesures de diffusion des électrons à l'aide de coronographes, aucune mesure directe des paramètres physiques de cette région n'a aujourd'hui été réalisée. Les champs magnétiques locaux ne peuvent être qu'extrapolés à partir de ceux de la photosphère à l'aide de simulations numériques. Ainsi, Solar Probe Plus est une mission d'exploration en lien étroit avec la problématique de l'accélération du vent solaire. Pour sa part, la sonde Solar Orbiter de l'ESA (lancement prévu en 2017) explorera l'environnement solaire à l'aide d'instruments *ex-* et *in situ* dans une région où le vent solaire est déjà accéléré (ou en voie de l'être) mais néanmoins encore proche du Soleil. La combinaison de ces mesures devrait permettre des progrès importants dans la compréhension des sursauts solaires, des éjections de masse coronale et de la formation des chocs. Ces phénomènes vont toujours de pair avec l'accélération de tout ou partie du plasma ambiant, et cette problématique rejoint ici celle des phénomènes éruptifs.

Concernant les moyens en physique solaire, la station de radioastronomie de Nançay dispose, avec deux spectrographes et un imageur, d'un ensemble sans pareil au niveau mondial pour les observations dédiées en ondes décimétriques-métriques. Les mises à niveau du Radiohéliographe (NRH) et du Réseau Décamétrique (NDA) font qu'en dépit de leur ancienneté, ces instruments sont employés dans de nombreuses études et publications (souvent associées à des données des sondes spatiales) pour caractériser l'activité de la couronne solaire moyenne ainsi que les électrons énergétiques et les chocs qui y sont produits. En particulier, les mesures du NRH sont employées avec celles d'autres

instruments pour l'étude des particules solaires de haute énergie (SEP) et en complément des diagnostics X et gamma.

Dans la magnétosphère terrestre, les quatre sondes MMS de la NASA (lancement prévu en 2015) devraient permettre des avancées importantes concernant la physique de la queue et le développement des sous-orages. En particulier, un apport significatif est attendu sur la microphysique associée à la reconnexion magnétique, sur l'accélération des particules et sur le rôle de la turbulence. MMS fournira la mesure des trois composantes du champ électrique (ce qui n'était pas le cas de CLUSTER), ce qui permettra notamment d'estimer la composante parallèle du champ électrique qui accélère efficacement le plasma. La mesure des fonctions de distribution des particules avec une haute résolution temporelle (30 ms pour les électrons et 150 ms pour les ions) permettra d'étudier les interactions ondes-particules sur une large gamme de fréquence. Les distances de 10 à 100 km entre les quatre satellites permettront également d'étudier les mécanismes d'accélération et de chauffage à des échelles comprises entre le rayon de giration/longueur d'inertie des électrons et celui/celle des protons.

La proposition de l'équipe THEMIS de repositionner les trois sondes proches en coordination avec les quatre satellites MMS n'a pas encore obtenu l'accord de la NASA pour un financement complet. L'équipe THEMIS a néanmoins initié les manœuvres nécessaires pour un alignement des trois sondes avec l'orbite de MMS en 2016-2017. Cette constellation MMS-THEMIS qui s'inspire directement du projet de mission européen Xscale, devrait conduire à des progrès déterminants dans la compréhension des couplages entre les processus physiques (accélération et chauffage) aux différentes échelles microscopique (électrons et protons) et macroscopique (magnétosphère). En ajoutant la prolongation de la mission CLUSTER approuvée par l'ESA jusqu'en 2015-2016, la communauté aura de facto accès à un jeu de données multi-points et à haute résolution (spatiale et temporelle) sans équivalent jusqu'à aujourd'hui.

#### ***2.6.4. Activité éruptive ou impulsive dans les plasmas***

La reconnexion magnétique est le processus au coeur de l'activité impulsive dans les plasmas. A la magnétopause, c'est un mécanisme par lequel des particules du vent solaire peuvent pénétrer à l'intérieur de la magnétosphère et donc affecter notre environnement proche. Des simulations numériques bi-fluides ont récemment montré que des instabilités de Kelvin-Helmoltz se développent dans les zones de cisaillement de vitesse, créant de facto une topologie du champ magnétique propice au développement d'instabilités de déchirement et au mélange des plasmas de la magnétogaine et de la magnétosphère. Dans ces simulations, l'inertie des électrons est le mécanisme qui brise le caractère « gelé » du champ dans le plasma et autorise la reconnexion des lignes de champ. Il est maintenant nécessaire de prendre en compte l'aspect 3D pour évaluer l'efficacité du développement spontané de la reconnexion dans un environnement turbulent proche de la magnétogaine. Une description ad-hoc de la microphysique dans les zones où se développe l'instabilité de déchirement est également nécessaire car les mécanismes à petite échelle peuvent affecter le taux de reconnexion (et par là-même la dynamique à grande échelle). Un couplage entre un code fluide (décrivant les grandes échelles de l'écoulement) et un code de type Vlasov (décrivant les effets cinétiques dans des régions limitées) sera nécessaire pour progresser dans ce

domaine.

Les perspectives futures incluent également la prise en compte de l'environnement méso-échelle complexe au sein duquel la reconnexion se déroule. Il est possible de scinder ces perspectives en deux catégories :

☞ Comment se déclenche la reconnexion dans un environnement complexe ?

C'est une question majeure dans quasiment tous les environnements où la reconnexion se produit. La grande majorité des études réalisées ont porté sur des géométries simples et souvent 2D. Les études récentes commencent à sortir de ce cadre en s'attachant par exemple à construire des équilibres cinétiques prenant en compte l'asymétrie que la majorité des couches de courant présentent entre les deux plasmas qu'elles séparent.

☞ Aspect multi-échelles de la reconnexion magnétique

La reconnexion magnétique est aujourd'hui étudiée sous deux angles différents. Certains travaux portent sur l'aspect global du phénomène, en abordant surtout ses conséquences sur les systèmes tels que magnétosphères ou structures magnétiques coronales et interplanétaires. Ils sont donc contraints de négliger l'aspect petite échelle à l'origine du processus. D'autres se concentrent sur l'aspect micro-échelle, afin de saisir l'importance de tel ou tel mécanisme cinétique sur la dynamique propre du phénomène (taux de reconnexion, accélération et chauffage du plasma) mais ils omettent l'influence des grandes échelles dans le déclenchement et le déroulement du processus. Les perspectives dans ce domaine sont importantes. En premier lieu, il faudra comprendre le rôle des conditions aux limites (spatiales et temporelles) imposées par la dynamique à grande échelle. Ensuite, il sera nécessaire de comprendre comment les mécanismes cinétiques étudiés ces dernières années sont modifiés lorsque la reconnexion se déroule dans un contexte méso-échelle complexe, impliquant par exemple une topologie 3D du champ magnétique (e.g., couronne, magnétopauses), des asymétries dans les propriétés du plasma, différentes espèces de plasma (e.g., Mercure, Ganymède) ou encore un environnement préalablement turbulent.

### **2.6.5. Météorologie de l'espace**

Les effets du vent solaire et des instabilités de la couronne sur l'environnement plasma et la haute atmosphère de la Terre sont multiples. Certains ont des conséquences sur la technologie et les personnes exposées. On peut citer par exemple :

- L'ionisation transitoire par les rayons EUV et X et les particules de haute énergie, laquelle affecte les communications par ondes hertziennes. Cette problématique est au cœur du projet FEDOME de l'Armée de l'Air. Au niveau mondial, l'aviation civile commence à développer des stratégies visant à minimiser les effets perturbateurs, notamment lors des vols en région polaire.
- Les grands événements à particules qui affectent la chimie de la haute atmosphère polaire et peuvent jouer un rôle dans la destruction de l'ozone.
- Les doses de radiation induites dans l'atmosphère terrestre par le rayonnement cosmique galactique (et, sporadiquement, par des particules relativistes solaires),



lesquelles peuvent affecter le personnel de l'aviation civile qui traverse les régions polaires de façon répétée.

- Les sursauts radio dans la bande de fréquence utilisée par les GNSS, qui constituent un risque de brouillage des signaux en cas d'événements extrêmes.
- L'interaction du champ magnétique transitoire des éjections coronales de masse avec le champ magnétique terrestre, qui induit des courants électriques dans la croûte terrestre, lesquels sont susceptibles d'interférer avec les réseaux électriques.
- La variation à long terme de l'irradiance solaire. Les effets potentiels de cette variation de l'éclairement de la Terre constituent également un sujet de recherche.

Il faut souligner ici que nous avons aujourd'hui une faible compréhension des événements solaires extrêmes qui peuvent déjouer les protections d'ingénierie en service. De fait, les observations d'événements à particules entre 1942 et 1956 (i.e., avant l'ère spatiale) suggèrent des événements plus forts que ceux qui ont été enregistrés par les satellites. C'est par la recherche en amont que nous parviendrons à une meilleure compréhension des interactions physiques, à identifier la nature des risques, et éventuellement à quantifier leur ampleur.

Les champs d'action de la recherche astrophysique dans le domaine de la météorologie de l'espace comprennent :

- La fourniture d'expertise et l'interaction avec des utilisateurs.
- La fourniture de données pour la surveillance régulière de l'environnement plasma de la Terre (par exemple, pour la prévision des communications radio).
- Le développement d'outils de mesure (qui peuvent être ceux de la recherche ou des instruments conçus spécifiquement pour des services).
- Le développement de modèles qui décrivent la chaîne des processus (y compris des modèles simplifiés utilisables par les non-experts).

Les besoins de la météorologie de l'espace tels qu'ils se présentent aujourd'hui ne peuvent être satisfaits par un travail isolé sur les applications. La connaissance des événements extrêmes qui sont le défi le plus important de la météorologie de l'espace repose sur des travaux de recherche fondamentale (e.g., *Aulanier et al.*, 2013). Les résultats de recherche sur les processus physiques doivent être intégrés dans les services d'observation et les modèles de prévision. La confrontation avec les succès et les échecs de la prévision est elle-même un élément important pour tester notre compréhension des processus physiques, mais ceci est insuffisant pour les services opérationnels avec leurs exigences de fiabilité et de couverture temporelle. L'intervention et le pilotage par les acteurs extérieurs (demandeurs de services) sont indispensables, et la recherche fondamentale doit soutenir ces activités par la fourniture de données, d'outils et/ou d'expertise. En d'autres termes, la communauté française propose pour la météorologie de l'espace une vaste expertise scientifique dans le domaine des relations Soleil-Terre-Héliosphère. Cette communauté dispose d'instruments de premier plan, de centres de données et de services à valeur ajoutée. Ces atouts devraient naturellement trouver leur place dans le programme Space Situational Awareness (SSA) de l'ESA.

### 3. INTERFACES AVEC LES AUTRES PROGRAMMES

Le PNST ne couvre à l'heure actuelle ni l'étude de la structure interne du Soleil, ni celle des atmosphères neutres (terrestre ou planétaires). L'exploration des plasmas et magnétosphères planétaires se trouve ainsi à l'interface avec le PNP, tandis que la génération du champ magnétique solaire et le magnétisme des étoiles de type solaire se trouvent à l'interface avec le PNPS. Les recherches sur les interactions entre l'environnement ionisé de la Terre et son atmosphère neutre se situent à l'interface avec les Sciences de la Terre.

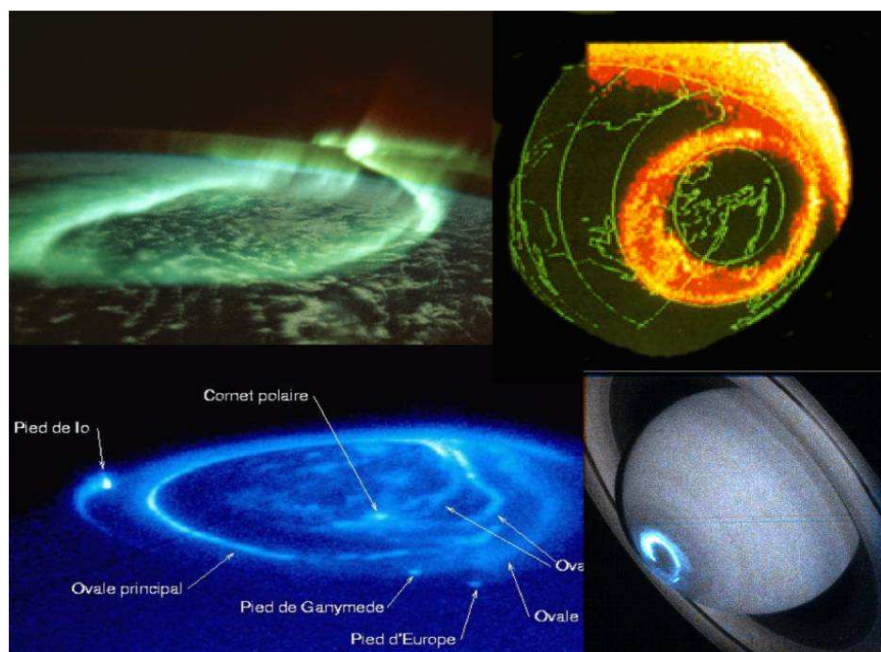
#### 3.1. Interface avec le PNP

Les activités du PNST se sont récemment étendues aux environnements magnétisés et ionisés d'autres objets du système solaire, à l'interface avec les sujets du PNP. La composition des conseils scientifiques du PNST et du PNP reflète bien les différences des activités des programmes : orientation vers la physique des plasmas au PNST, vers les atmosphères planétaires, la géophysique, la dynamique et la cosmochimie au PNP. Des projets soumis à la fois au PNST et au PNP traitent des couplages entre le milieu interplanétaire et le Soleil avec les surfaces et les atmosphères planétaires (Terre incluse).

##### 3.1.1. Quelques thèmes récurrents

###### *☞ Les magnétosphères planétaires*

Les études des environnements magnétisés et ionisés des planètes géantes, des planètes telluriques du système solaire, de la Terre (d'un point de vue comparatif), et des exoplanètes (extrapolation de la physique et observations radio) portent sur la structure et la dynamique des magnétosphères, sur les processus d'accélération du plasma et de génération radio (basses fréquences), sur la physique aurorale (les aurores sont la projection de la dynamique magnétosphérique à basse altitude le long des lignes de champ magnétique) comme cela est illustré dans la figure 3.1.1, sur les interactions magnétosphère-vent solaire et sur les couplages magnétosphère-ionosphère-atmosphère. On notera par exemple la recherche observationnelle de signatures radio des magnétosphères des planètes géantes et d'exoplanètes (dans le cadre du projet LOFAR), les travaux liés à la mission CASSINI (mesure radio, *in situ*...), les observations UV des aurores (avec le télescope Hubble, la sonde Mars Express, la sonde CASSINI...) et les mesures *in situ* des sondes Mars Express et Venus Express.



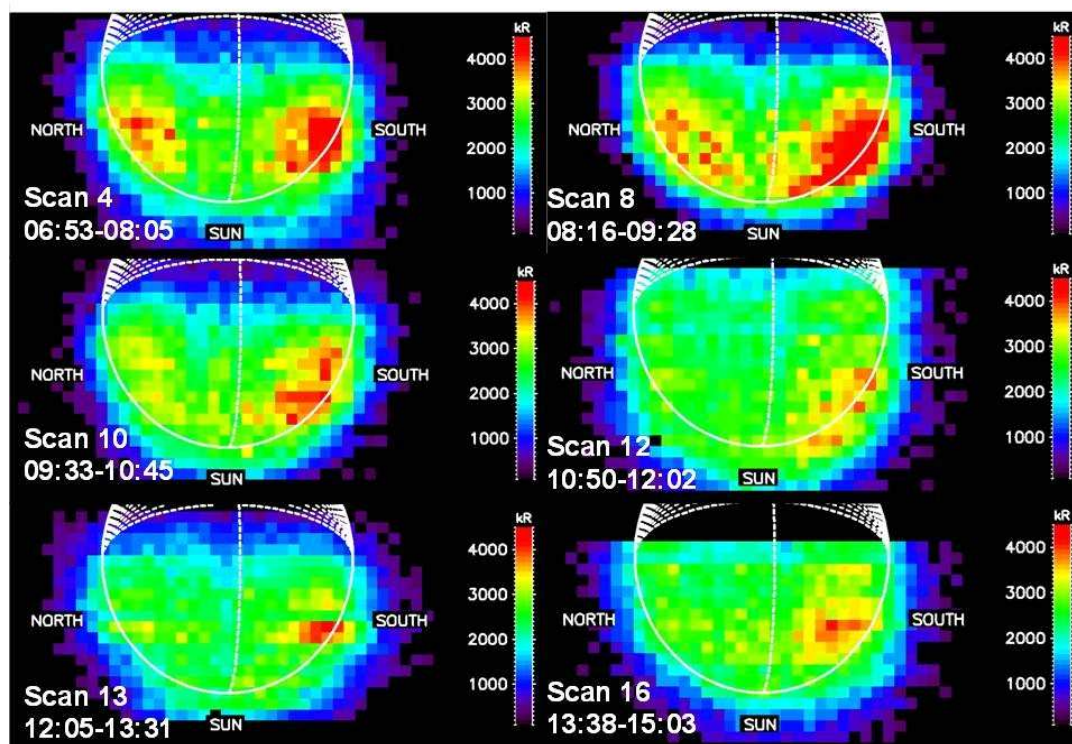
**Figure 3.1.1 :** Aurores planétaires. De haut en bas, sur Terre (depuis la navette dans le visible et vu par Dynamics Explorer-1 dans UV 130 nm), sur Jupiter (Télescope Hubble) et sur Saturne (Télescope Hubble).

Les mesures *in situ* couplées à la modélisation des magnétosphères planétaires ont permis de mieux appréhender l'origine des émissions radio sur Saturne et sur Jupiter (*Schippers et al.*, 2011 ; *Hess et al.*, 2012), et d'établir un lien entre celles de la Terre et celles de Saturne (*Lamy et al.*, 2010). De tels travaux ont également permis de contraindre les modèles de champ magnétique jovien à partir des émissions radio de Io (*Hess et al.*, 2011), de caractériser les émissions UV sur Uranus (*Lamy et al.*, 2012), de progresser dans la modélisation de l'interaction du vent solaire avec Mars (*Bertucci et al.*, 2013 ; *Modolo et al.*, 2012) et avec Mercure (*Richer et al.*, 2012). Un code développé pour l'étude des rayonnements radio de Io et de Jupiter a été adapté aux autres planètes, ainsi qu'à la modélisation de possibles rayonnement radio d'exoplanètes (*Hess et Zarka*, 2011) dont la recherche est en cours (*Lecavelier Des Etangs et al.*, 2011).

#### ☞ Les relations entre atmosphères/surfaces et magnétosphères

Plus particulièrement à l'interface PNST-PNP, les relations entre atmosphères/surface et magnétosphères bénéficient des mesures de plusieurs missions actuelles autour de Mars (Mars Express, Mars Global Surveyor), Vénus (Venus Express) et Saturne (CASSINI) et de la préparation des prochaines grandes missions européennes vers Mercure (Bepi-Colombo) et vers Jupiter (JUICE). Ils font l'objet de travaux théoriques ou basés sur des mesures *in situ* ou obtenues à partir du sol comme cela est illustré dans la figure 3.1.2. Ces activités englobent l'analyse des émissions des hautes atmosphères planétaires induites par l'interaction du plasma solaire avec l'ionosphère et l'exosphère de Mars (*Koutroumpa et al.*, 2012), de Vénus (*Chaufray et al.*, 2012), de Mercure (*Lopez-Ariste et al.*, 2012) et sur Terre (*Lilensten et al.*, 2008). Ces études s'appuient également sur des développements théoriques traitant de la chimie ionosphérique et de ses conséquences pour l'échappement

atmosphérique martien (*Lilensten et al.*, 2013), ou traitant de la formation des exosphères planétaires (*Yagi et al.*, 2012 ; *Turc et al.*, 2013).



**Figure 3.1.2 :** Observations de l'émission visible de l'exosphère de sodium de Mercure réalisées avec le télescope solaire THEMIS (*Leblanc et al.*, 2009).

### ☞ Nano-poussières

Les avancées technologiques des dernières générations d'instruments radio, en particulier des captures de formes d'ondes à haute résolution temporelle, ont permis d'aboutir à des résultats scientifiques originaux. Les premières (et à ce jour uniques) mesures *in situ* de grains de poussières nanométriques (3-15 nm) au voisinage de l'orbite terrestre ont été réalisées à partir de l'instrument S/WAVES de STEREO (*Meyer-Vernet et al.*, 2009 ; *Zaslavsky et al.*, 2012 ; *Le Chat et al.*, 2013). Des nano-poussières ont également été détectées dans d'autres environnements, par exemple au voisinage de Saturne grâce à CASSINI (*Meyer-Vernet*, 2013 ; *Schippers et al.*, 2014). La découverte de nano-poussières s'est accompagnée d'un travail de modélisation du processus de génération du signal électrique détecté par les antennes radio lors d'un impact de poussière sur une sonde (*Pantellini et al.*, 2012, 2013). Une étude approfondie des corrélations des signaux détectés sur les différentes antennes a permis d'obtenir, entre autres, une mesure particulièrement précise du flux de poussières d'origine interstellaire à une unité astronomique (*Belheouane et al.*, 2012). L'interprétation détaillée de la détection de nano-poussières a stimulé l'étude d'applications nouvelles des instruments radio.

### 3.1.2. Perspectives

L'actualité spatiale sera particulièrement riche dans les années à venir. On notera en premier lieu l'arrivée de la sonde ROSETTA autour de la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko à l'automne 2014, le lancement de la mission Bepi-Colombo en juillet 2016, la poursuite des missions CASSINI, Venus Express et Mars Express. A noter que cette dernière opérera à partir de 2014 en collaboration avec la mission NASA MAVEN (lancée en novembre 2013). La préparation de la mission JUICE vers Jupiter ainsi que les discussions autour des futures missions européennes (par exemple vers Uranus avec la mission Uranus Pathfinder) seront autant d'occasions de projets scientifiques nouveaux. L'étude des magnétosphères planétaires et exoplanétaires passe aussi par les observations au sol. Ces observations bénéficieront prochainement de la nouvelle génération de radio-télescopes comme LOFAR et SKA (*Griessmeier et al.*, 2011). Ainsi, la collaboration PNST-PNP apparaît naturelle, l'ensemble des projets mentionnés ci-dessus portant sur des thématiques liées à des grandes questions du PNST (e.g., échappement de matériau planétaire dans la magnétosphère et dynamique magnétosphérique) et en lien direct avec celles du PNP (e.g., atmosphères planétaires et évolution des corps du système solaire).

Soulignons aussi la découverte de nano-particules de poussière dans le milieu interplanétaire par STEREO, qui ouvre un domaine nouveau à l'interface entre la physique des plasmas et la planétologie (ces nano-particules étant à mi-chemin entre les grosses molécules et les petits corps du système solaire). Les travaux observationnels, théoriques et de modélisation numérique nécessaires pour la compréhension des interactions plasma/poussières dans le milieu interplanétaire constitueront une ouverture thématique du PNST.

Pour conclure, on notera que, lors du colloque PNST à mi-parcours en mars 2012, de nombreuses présentations ont été faites sur les relations Soleil-Terre mais aussi sur les relations Soleil-planètes. Par exemple, la présentation d'Alain Hauchecorne qui relève du programme LEFE portait sur « l'impact de l'activité solaire sur la stratosphère et le climat ». La description de l'impact de l'activité solaire sur notre atmosphère et sa prise en compte dans les modèles atmosphériques constituent des questions complexes, en partie traitées pour d'autres objets planétaires dans le cadre de collaborations PNST-PNP. En outre, le PNST a une expertise sur la haute atmosphère terrestre/ionosphère et devrait donc être amené à collaborer avec LEFE pour l'extension des modèles atmosphériques terrestres vers les hautes altitudes. Cette collaboration pourrait être développée à la façon des récentes collaborations entre PNP et PNST pour traiter la question du couplage entre enveloppe fluide et enveloppe plasma des objets planétaires.

### **3.2. Interface avec le PNPS**

La génération du champ magnétique à l'intérieur du Soleil et le magnétisme des étoiles de type solaire sont des thématiques importantes à la fois pour le PNST et pour le PNPS. Les étoiles qui comme le Soleil possèdent une enveloppe convective, offrent en effet la possibilité d'observer la dynamo de type solaire dans d'autres conditions (rotation, masse, métallicité) que celles rencontrées dans le Soleil. Ces étoiles fournissent ainsi des contraintes additionnelles qui sont essentielles pour comprendre et modéliser la dynamo solaire. A l'inverse, le Soleil constitue l'étoile de référence pour étudier la génération du champ

magnétique dans les étoiles de type solaire, notamment parce que l'hélio-sismologie permet de préciser les conditions dans lesquelles opère la dynamo.

### 3.2.1. *Quelques faits marquants*

#### ☞ *Influence de la rotation et de la masse des étoiles de type solaire sur la topologie et l'intensité du champ magnétique*

Les observations spectro-polarimétriques d'étoiles analogues au Soleil se développent très rapidement. Ces observations permettent de mesurer l'évolution du champ magnétique global sur d'autres étoiles que le Soleil (*Morgenthaler et al.*, 2012 ; *Morgenthaler et al.*, 2011 ; *Mathur et al.*, 2013). Ces résultats illustrent bien l'intérêt de la connexion solaire-stellaire pour l'étude du Soleil puisque ces contraintes permettent de tester les modèles de dynamo solaire dans une autre gamme de paramètres.

#### ☞ *Détection de cycle d'activité magnétique*

*Garcia et al.* (2010) ont détecté pour la première fois dans une autre étoile que le Soleil (HD49933) une variation de la fréquence des modes propres en fonction du temps liée à l'évolution du champ magnétique sur une période de quelques mois. Cette variation de fréquence est causée par le champ magnétique qui change la structure de surface de l'étoile et modifie ainsi la cavité résonnante de cette étoile. Cette détection a été faite avec la mission CoRoT.

Soulignons également que différentes conférences ont été organisées. La conférence "A new era of seismology of the Sun and solar-like stars" organisée avec des financements PNST et PNPS, s'est tenue à Aix-en-Provence en juin 2010. Les sessions portaient sur l'hélio-sismologie locale, le diamètre solaire, l'irradiance et l'activité, les modèles solaire et stellaire, l'astéro-sismologie. Les premiers résultats de missions spatiales portant sur la convection, la dynamo et la dynamique ont également été discutés. Cette conférence a notamment permis la présentation des premiers résultats de Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) du Solar Dynamics Observatory (SDO) (*Appourchaux*, 2011). Un symposium IAU "Magnetic fields through stellar evolution" a par ailleurs été organisé à Biarritz en août 2013, également avec des financements PNST et PNPS. Les sessions portaient sur l'évolution des étoiles, les activités solaire et stellaires dans les photosphères, chromosphères et couronnes et les cycles associés, les interactions planète-étoile, les dynamos stellaires dans le diagramme HR, les géantes et sous-géantes actives et froides, la dynamo et la perte de masse dans les géantes et supergéantes, les phases finales de l'évolution stellaire et le magnétisme dans les objets compacts.

### 3.2.2. *Quelques thèmes récurrents*

#### ☞ *Comment le champ magnétique est-il engendré à l'intérieur du Soleil et des étoiles ?*

Les processus par lesquels les mouvements du plasma peuvent engendrer des champs magnétiques sont encore mal compris et font l'objet de recherches fondamentales (notamment dans le cadre du GDR dynamo). Les questions spécifiques aux dynamos solaire

et stellaires concernent la génération d'un champ magnétique par les mouvements de convection thermique et le rôle joué par la rotation différentielle notamment dans la couche d'interface avec la zone radiative (la tachocline). Les contraintes apportées par l'héliosismologie et l'astéro-sismologie sur la dynamique interne (rotation différentielle, mouvements de circulation, profondeur de la zone convective) jouent ici un rôle essentiel.

☞ Comment le magnétisme des étoiles de type solaire se compare-t-il à celui du Soleil ?

Une dynamo de type solaire peut en principe exister dans toutes les étoiles qui possèdent une enveloppe convective en rotation différentielle. Cela concerne principalement les étoiles froides mais aussi toutes les étoiles qui se trouvent dans la phase de géante rouge. L'observation de ces étoiles nous permet donc d'aborder de nouvelles questions sur la dynamo de type solaire, à savoir : quels sont les effets de la rotation, de la masse et de la métallicité de l'étoile sur la distribution de surface du champ magnétique, sur la variabilité du champ à court terme (taches stellaires) et à long terme (cycles magnétiques), sur l'activité magnétique impulsive (éruptions, CMEs) ?

Au cours des quatre dernières années, différentes demandes ont été faites au PNST qui relèvent de thématiques à l'interface PNST-PNPS. La quasi-totalité de ces demandes ont été faites à la fois au PNST et au PNPS. Citons par exemple les propriétés des convections solaire et stellaire qui ont été explorées au moyen de simulations numériques globales (*Toomre et al., 2012 ; Brun et al., 2011 ; Bessolaz and Brun, 2011 ; Brun et al., 2010*). Des simulations de la dynamo ont également été réalisées dans des régimes de paramètres correspondant à d'autres étoiles de type solaire (*Augustson et al., 2013a ; DeRosa et al., 2012 ; Brown et al., 2011 ; Jouve et al., 2010*) ainsi qu'à des étoiles plus chaudes de type F (*Augustson et al., 2013*). L'émergence de boucles de flux magnétique a été étudiée sur le Soleil avec des simulations de la zone convective (*Pinto et Brun, 2013 ; Jouve et al., 2013*), et l'assimilation de données a été utilisée pour améliorer un modèle de dynamo solaire (*Jouve et al., 2011*). Les phénomènes de transport de moment angulaire ont été étudiés dans les étoiles (*Mathis et De Brye, 2012a,b*), de même que l'influence des interactions étoiles-planètes sur ce transport (*Mathis et al., 2013*). Les mesures spectro-polarimétriques de trois étoiles observées par CoRoT ont permis de donner des limites inférieures à l'activité magnétique de ces étoiles (*Mathur et al., 2013*).

### 3.2.3. Perspectives

Plusieurs thématiques sont appelées à se développer en France dans les prochaines années :

- L'exploitation des spectro-polarimètres ESPADONS et NARVAL va permettre d'explorer le magnétisme des étoiles de type solaire. Les programmes d'observation concernant les jumeaux solaires, les étoiles de type F où l'épaisseur de l'enveloppe convective devient négligeable ou, à l'inverse, les étoiles de type M où la zone convective envahit toute l'étoile vont fournir des voies d'exploration intéressantes.
- Les simulations numériques de la dynamo de type solaire vont également se développer au cours des prochaines années. Ces simulations sont stimulées par l'existence de

contraintes observationnelles dans une large gamme de rotations et de masses qui permettront de tester le réalisme de ces modèles numériques globaux.

- L'astéro-sismologie va fournir des informations importantes sur la rotation interne des géantes et sous-géantes grâce à la détection des modes mixtes dans ces étoiles (*Mosser et al.*, 2012 ; *Deheuvels et al.*, 2012 ; *Deheuvels et Michel*, 2011). Ces études permettront de mieux préciser les modèles de transport de moment angulaire dans les étoiles et leur relation avec la génération du champ magnétique dans ces mêmes étoiles.
- L'astéro-sismologie peut en principe préciser les conditions de génération des champs magnétiques observés par spectro-polarimétrie puisqu'elle fournit des informations directes sur l'épaisseur de l'enveloppe convective et sur la rotation différentielle interne. Avec les données des missions spatiales d'astéro-sismologie, la possibilité d'ajouter les contraintes obtenues par spectro-polarimétrie et astéro-sismologie constitue une voie de recherche prometteuse pour comprendre la dynamo des étoiles de type solaire. En particulier, l'estimation sismique des gradients de vitesse angulaire à la base de la zone convective devrait permettre d'étudier le rôle de la tachocline sur la dynamo. Les relations entre la structure interne déduite de l'astéro-sismologie et les observations sol de traceur d'activité stellaire (Ca II H&K) vont permettre de mieux comprendre comment l'activité stellaire est liée à l'âge de l'étoile (*Karoff et al.*, 2013).
- Les missions spatiales futures apporteront des éléments importants pour la compréhension de la dynamo solaire. SDO grâce à sa haute résolution pourra sonder la tachocline, la circulation méridionale et observer l'émergence de régions actives. SOLAR ORBITER qui devrait être lancé en 2017, permettra de mieux observer la dynamique aux pôles du Soleil grâce à une orbite inclinée de 37° par rapport à l'équateur solaire. De plus, le fonctionnement en tandem de SOLAR ORBITER et de SDO permettra pour la première fois de faire de la sismologie stéréoscopique et de sonder les zones les plus profondes du Soleil. De son côté, PLATO permettra de déterminer l'âge des étoiles et des exoplanètes, ainsi que d'étudier les relations étoile-planètes.



## **4. MOYENS, SERVICE ET OUTILS**

### **4.1. Instrumentation au sol et dans l'espace**

#### **4.1.1. THEMIS**

Le télescope THEMIS continue ses observations à l'Observatoire du Teide aux Îles Canaries. Le contexte de réduction budgétaire suite à son changement de statut (de TGE à installation à la charge directe de l'INSU) en 2007 s'est traduit par une réduction du personnel sous contrat local et du nombre de jours d'observations proposés par an. Malgré ces conditions difficiles, les campagnes se sont poursuivies avec un facteur de pression entre 1 et 2, typique des installations solaires de par le monde. Les thèmes d'observation peuvent être résumés en trois grands catégories : magnétométrie et dynamique de la photosphère solaire, magnétométrie et dynamique des filaments et protubérances, et dynamique de l'exosphère de Mercure.

Du point de vue de l'évolution future de cette installation, la situation est passée d'un projet d'arrêt définitif à la fin 2014 à une situation plus constructive où un fonctionnement (à budget courant cependant non garanti) est souhaité par le CNRS jusqu'à 2017 au minimum (et probablement au-delà). Ce changement positif a été favorisé par la participation de THEMIS au projet EST (voir §4.1.4) en collaboration avec la communauté solaire européenne. Des financements européens ont été obtenus, en premier lieu pour une étude de concept de EST (2008-2011), puis pour un projet I3 intitulé SolarNet (2013-2016) permettant une évolution technique de THEMIS avec le développement d'une optique adaptative. La participation à ces projets a contribué favorablement à la situation financière de THEMIS, mais elle a également placé son évolution dans un cadre collaboratif avec les autres moyens d'observation solaire en Europe. Ainsi, le document AstroNet (actualisé à l'été 2013) cite explicitement THEMIS comme l'une des trois installations solaires européennes en activité et mentionne explicitement comme objectif de les préserver jusqu'à l'arrivée d'EST. Les partenaires espagnols de l'Instituto de Astrofísica de Canarias ont en conséquence conditionné la négociation de la cession de propriété de THEMIS à la participation à ces projets et au maintien de l'activité française sur ce télescope dans les années à venir. A l'initiative de l'INSU, un groupe de travail sur ce sujet a été mis en place en avril 2014. Au cours de ces dernières années, le Conseil Scientifique du PNST a fortement soutenu l'équipe gestionnaire du télescope, la production d'observations, et la communauté scientifique associée. Cela s'est traduit par des recommandations répétées à l'INSU pour souligner la qualité scientifique des résultats obtenus et l'intérêt à les poursuivre dans le cadre le plus favorable possible pour la communauté solaire française. De même, le CS du PNST a financé et continue de financer les missions d'observation des astronomes français à THEMIS, suite à la perte du budget de mission attribué par défaut aux TGE. Le PNST a en outre contribué au développement de l'instrumentation du télescope avec un soutien au nouveau polarimètre à cristaux liquides et au nouvel instrument de spectro-imagerie TUNIS.

#### **4.1.2. SuperDARN**

SuperDARN (Super Dual Auroral Radar Network) est un consortium international de radars cohérents HF fournissant des observations continues de la convection du plasma ionosphérique dans les régions de haute latitude (zones aurorales et calotte polaire des deux hémisphères). Ces radars donnent accès à la cartographie vectorielle du champ de vitesse du plasma ionosphérique. La France participe à ce réseau avec un radar aux Iles Kerguelen. On notera que, jusqu'en 2012, la France possédait également un radar en Islande (transféré à l'université de Lancaster) et qu'un projet de construction de deux radars au Dôme C (Antarctique) était envisagé en collaboration avec l'Italie. Le radar des Iles Kerguelen qui requiert une maintenance tous les 3 ou 4 ans (jouvence, rénovation des antennes et du système informatique), a pour atout de sonder l'ionosphère aurorale de l'hémisphère sud, laquelle est peu étudiée jusqu'à aujourd'hui du fait de la difficulté d'accès et d'installation d'instruments dans ces régions (hautes latitudes australes). Cette position particulière dans le réseau SuperDARN fait toute la pertinence et l'originalité du radar de Kerguelen puisqu'il assure le suivi global des régions aurorales australes avec les autres radars du réseau. En outre, étant conjugué au radar anglais d'Hankasalmi en Finlande qui est situé sur les mêmes lignes de champ mais du côté nord, le radar de Kerguelen permet d'étudier les différences de comportement dynamique entre les deux hémisphères.

La couverture planétaire de SuperDARN et le fonctionnement continu des radars font de ce réseau un outil de choix pour caractériser l'état global de la magnétosphère en quasi-temps réel. Un tel suivi magnétosphérique est particulièrement intéressant dans le cadre de la météorologie de l'espace. Les mesures de SuperDARN permettent également d'étudier l'efficacité du couplage local entre l'ionosphère et la magnétosphère, par exemple lors d'événements de reconnexion transitoire du côté diurne ou du côté nocturne. On notera en outre qu'il existe au sein de la communauté PNST des modèles d'ionosphère (TRANSCAR) et de magnétosphère (IMM) qui, une fois couplés aux mesures de SuperDARN, permettent d'accéder à des paramètres ionosphériques et magnétosphériques non mesurables directement par les instruments (e.g., distribution du potentiel de convection, conductivité). Le réseau SuperDARN apporte enfin un soutien précieux pour les mesures coordonnées entre instruments sol (coordination SuperDARN-Eiscat-ESR) et instruments embarqués sur satellites (CHAMP, DEMETER, CLUSTER, THEMIS, SWARM, et prochainement MMS).

#### **4.1.3. EISCAT**

L'ionosphère des hautes latitudes joue un rôle clé dans le couplage entre vent solaire et atmosphère terrestre. De ce point de vue, les radars à diffusion incohérente EISCAT sont des outils incontournables puisqu'ils permettent d'obtenir les profils en altitude de paramètres physiques essentiels (concentration électronique, températures électronique et ionique...). Le réseau EISCAT est en fonction depuis 1981 pour les radars continentaux, et depuis 1996 et 1999 pour les deux radars installés sur l'île du Spitzberg (ESR). Tout au long de ces années, le système de radars a été constamment amélioré, tant pour le système d'émission que pour les méthodes d'analyse. A l'aide de ces radars, la communauté française travaille principalement sur le chauffage et l'échappement des ions de l'ionosphère polaire diurne, sur la polarisation aurorale ou encore sur le déphasage observé entre chauffages électronique et ionique (via des expériences actives ou des simulations avec le modèle TRANSCAR), les données EISCAT communes et françaises étant maintenant archivées exclusivement au CDPP.

Aujourd'hui, le système tri-statique UHF est en cours de remplacement par un nouveau réseau de radars, EISCAT 3D. L'étude de faisabilité de ce projet s'est terminée au printemps 2009 et la phase préparatoire (financée dans le cadre de FP7) s'achèvera fin 2014. La communauté française participe à cette phase préparatoire en tant que partenaire associé (statut officialisé par l'INSU en 2009), par exemple dans le groupe de travail intitulé « Science Planning and Users Engagement » qui a pour but la définition des objectifs scientifiques et des modes opératoires, l'identification des utilisateurs potentiels et la prise de contact avec les communautés associées (en particulier les modélisateurs). EISCAT 3D aura des résolutions temporelle et spatiale bien meilleures que le système actuel (supérieures environ d'un facteur 10, ce qui donnera accès à la microphysique ionosphérique) et un sondage volumétrique rendu possible par l'émission simultanée de plusieurs faisceaux. Ce système donnera également accès aux profils en altitude de grandeurs vectorielles (vitesse, champ électrique), ce qui améliorera considérablement notre vision de l'ionosphère et de ses couplages avec les régions connexes.

En 2007, la France s'est désengagée de l'association EISCAT mais l'INSU a gardé un budget pour l'achat d'heures sur projets, ainsi qu'un financement pour les missions associées. Dans un contexte financier difficile, cette approche a été récemment revue puisque l'achat d'heures a baissé de 25% en 2011 et a été purement et simplement supprimé en 2013. A partir de 2014, les règles EISCAT vont être modifiées et l'achat d'heures en vigueur jusqu'à aujourd'hui ne sera a priori plus possible. En effet, pour avoir une visibilité budgétaire à moyen terme et assurer le financement d'EISCAT 3D, l'association demande désormais un minimum d'engagement sur la durée via deux statuts possibles :

- soit un statut d'associé comme celui qu'avait la France jusqu'en 2006. Ce statut s'acquiert en versant une première somme conséquente (au moins 5% des 130 M€ nécessaires à la construction d'EISCAT 3D), puis une contribution annuelle à négocier. Un engagement de minimum 5 ans est en outre exigé.

- soit un statut d'affilié qui est plus souple en terme d'engagement et moins coûteux (le « ticket d'entrée » étant de 12 k€). Compte tenu des contraintes budgétaires de l'INSU, c'est ce statut qui a été privilégié, et le financement requis a été alloué par la CSAA en 2014.

#### ***4.1.4. European Solar Telescope (EST)***

EST est un projet de télescope solaire polarimétrique de 4 m avec optique adaptative. Son instrumentation inclut plusieurs imageurs ainsi que de la spectropolarimétrie sur des champs de 2' et une résolution spatiale meilleure que 0,1". Le télescope EST est destiné à une étude exhaustive du magnétisme solaire, et en particulier à une étude des mécanismes d'émergence et de disparition du flux photosphérique et des connections photosphère-chromosphère-basse couronne. Dans sa dernière mise à jour, le document "Astronet Infrastructures Roadmap" des agences européennes d'astronomie cite EST comme le projet phare de la physique solaire européenne. Avec une étude de design financée dans le cadre du programme FP7 et finalisée début 2011, ce projet attend maintenant d'apparaître dans une prochaine mise à jour de la carte d'infrastructures européennes (ESFRI), étape préalable à la construction. Dans cette attente, la communauté solaire fédérée autour d'EST a obtenu le financement du projet I3 SolarNet (6 M€) qui a pour objectif de consolider les collaborations et de partager le temps d'observation des télescopes solaires européens (en

particulier ceux des Iles Canaries), préfigurant ainsi la gestion d'EST. La communauté française participe à EST via l'équipe de THEMIS, une équipe du pôle solaire du LESIA (instrument DPSM de nouvelle génération), et une autre de l'IRAP (bases de données). Le télescope EST est incontestablement le projet attendu en Europe pour les observations solaires à partir du sol, et il est particulièrement attendu par la communauté française qui voit en ce télescope la suite naturelle de THEMIS. Cette communauté propose donc de phaser la fermeture de THEMIS (voir §4.1.1) avec l'arrivée d'EST. L'intérêt du projet EST a souvent été souligné par le CS du PNST ces dernières années, et le PNST a soutenu différents colloques visant à structurer la communauté autour de ce projet (e.g., "EST-France", Observatoire de Meudon, 2009 ; "Solar physics at the advent of the European Solar Telescope", Colloque SF2A, 2012).

#### ***4.1.5. Radio-héliographe et spectrographes de Nançay***

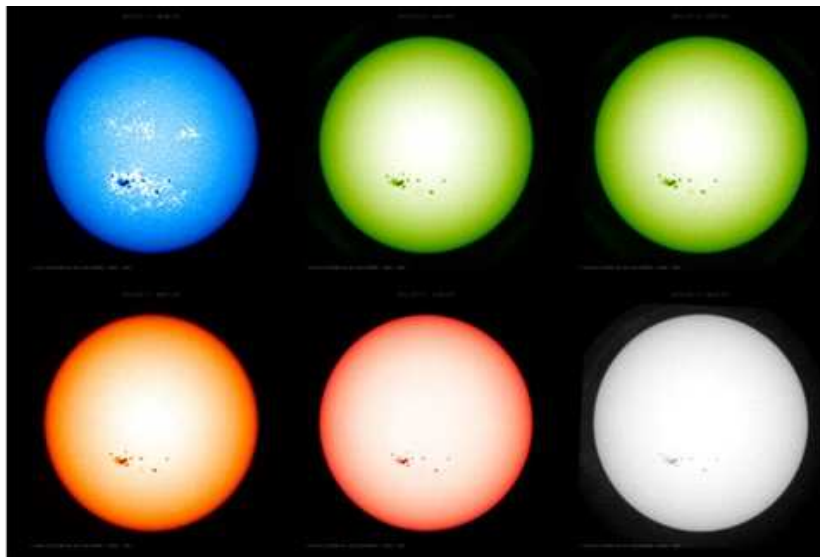
La station de radioastronomie de Nançay possède trois instruments complémentaires pour l'observation du Soleil : le radiohéliographe (NRH), seul imageur au monde dédié au Soleil en ondes décimétriques-métriques (150-450 MHz) et les spectrographes ORFEES (130-1000 MHz) et Décamétrique (NDA ou DAM ; 5-80 MHz). Cet ensemble, unique au monde, constitue une base de recherches pour une communauté internationale (la moitié des publications du NRH émane de groupes étrangers). Les deux développements majeurs des dernières années étaient la construction et mise en service du spectrographe ORFEES (avec le soutien de l'Armée de l'Air) et l'extension de la gamme observable au NDA vers les basses fréquences par le développement d'un récepteur à réjection de parasites. En dehors d'une activité de recherche sur la structure et la dynamique de la couronne et ses relations avec l'héliosphère, les instruments alimentent la météorologie de l'espace, comme le montre l'implication de l'Armée de l'Air dans le projet de démonstrateur FEDOME (voir §2.5). Dans les années à venir, ces instruments ne seront pas remplacés par un nouveau projet couvrant une gamme spectrale comparable. En revanche, l'utilité de radiotélescopes puissants tels que LOFAR devrait être renforcée par la connexion avec la plus basse couronne à laquelle donnent accès les observations en ondes décimétriques à Nançay. Dans le contexte de Solar Orbiter et Solar Probe Plus, les instruments radio dédiés seront des outils importants pour étudier la structure de la couronne et la propagation des perturbations (CMEs, ondes de choc, particules énergétiques) dans la couronne et vers l'héliosphère.

#### ***4.1.6. PICARD-sol***

PICARD-sol est un ensemble d'instruments destinés au suivi à long terme de la mesure du rayon solaire depuis le sol (voir le site <https://solar-physics.oca.eu/spip.php?rubrique58>). Le suivi continu de ce paramètre fondamental a été entamé en 1978 à Calern (OCA) à partir d'un astrolabe (mesure de temps de transit à une hauteur donnée) avec des mesures initialement visuelles, puis CCD. Le principal résultat de cette campagne couvrant presque trois cycles solaires a été de révéler une variation significative du rayon solaire apparent, pouvant atteindre 200 mas pic à pic et anti-corrélée avec l'activité solaire (*Laclare et al.*, 1996 ; *Morand et al.*, 2011). La question de l'origine solaire ou atmosphérique de cette variation apparente a conduit au développement de la mission spatiale PICARD. La durée d'une telle mission spatiale étant nécessairement limitée, il est apparu important de suivre le diamètre solaire depuis le sol avec une précision suffisante et en dissociant effets

atmosphériques ou instrumentaux d'éventuelles variations d'origine solaire. Dans ce but, il a été décidé d'utiliser le modèle de qualification de SODISM (SODISM-2) associé à un moniteur de turbulence diurne (MISOLFA) qui permet de mesurer l'ensemble des paramètres spatio-temporels de la turbulence. Ces deux instruments sont opérationnels sur le site de Calern depuis mars 2011, et ils ont été complétés par un photomètre multi-longueurs d'onde (université de Lille), un pyranomètre et une caméra grand champ permettant de qualifier à chaque instant la qualité des images acquises.

Les premiers résultats de SODISM-2 montrent une très bonne stabilité instrumentale au cours de deux ans d'observation (*Meftah et al.*, 2013). Une nouvelle approche a été développée pour la calibration radiométrique, laquelle permet la production de données calibrées qui peuvent être diffusées en quasi temps réel (3 à 8 minutes après acquisition). La figure 4.1.1 en fournit un exemple. Ce premier niveau de calibration ouvre la porte à d'autres applications (e.g., suivi de l'irradiance spectrale, météorologie de l'espace). Il faut souligner ici que la mise en œuvre de cette base instrumentale à l'OCA (en collaboration avec le LATMOS et le CNES) a conduit à une évolution de l'instrumentation et des méthodes. L'anomalie avérée sur la composante spatiale de SODISM ne permet pas l'inter-calibration initialement envisagée, ce qui a conduit à la "dé-labellisation" par l'INSU de l'astrométrie solaire sol en même temps que celle de PICARD (on notera que des mesures du diamètre hors atmosphère ont néanmoins pu être effectuées lors du transit de Vénus). Le PNST soutient l'exploitation des données de PICARD-SOL et estime que les observations doivent être poursuivies (au moins le temps d'une thèse qui est en cours, et idéalement pour couvrir l'ensemble d'un cycle solaire).



**Figure 4.1.1 :** Exemple d'images SODISM-2 du 07/11/2012 : (haut) 393 nm, 535 nm (2 filtres), (bas) 607 nm, 782 nm et 1025 nm. La résolution est voisine d'une arc-seconde et les images originales comportent 2048 x 2048 pixels.

## 4.2 Instrumentation Spatiale

La figure 4.2.1 présente une synthèse des projets spatiaux dans lesquels la communauté PNST est impliquée. Une priorité majeure de cette communauté est le programme obligatoire de l'ESA qui de fait contribue à structurer les activités. Ceci impose notamment la réalisation de la dernière mission « Pierre Angulaire » du programme « Horizon 2000 » et celle de la première mission du programme "Cosmic Vision", à savoir : BEPI COLOMBO et SOLAR ORBITER.

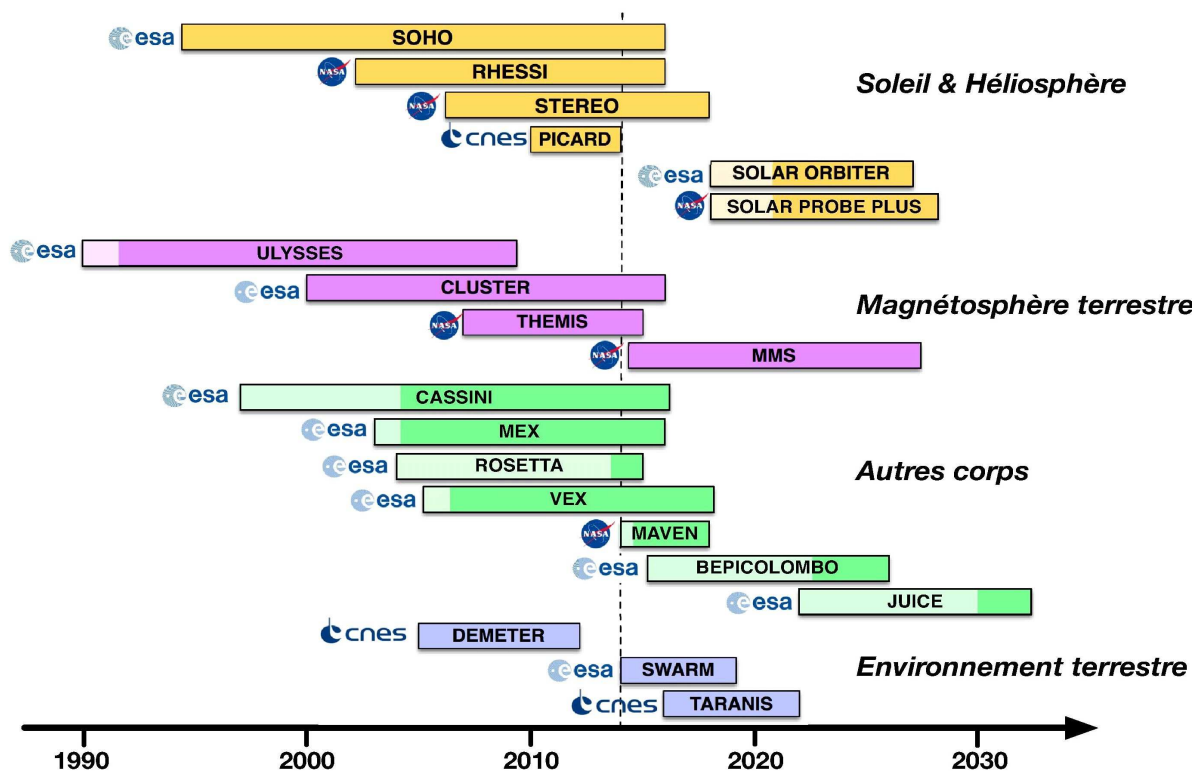


Figure 4.2.1 : Projets spatiaux de la communauté PNST (Dudok de Wit, 2014).

#### 4.2.1. SOLAR ORBITER et SOLAR PROBE PLUS

Sur le plan programmatique, un fait saillant de la période 2010-2013 est incontestablement la sélection définitive des missions SOLAR ORBITER et SOLAR PROBE PLUS. La mission SOLAR ORBITER qui est maintenant programmée pour un lancement en juillet 2017 est dédiée à des observations d'imagerie à haute résolution spatiale combinées à des mesures *in situ* près du Soleil (0,28 UA) et à des observations hors écliptique (dans la phase étendue de la mission). La communauté française est fortement impliquée dans cette mission avec des participations importantes dans 6 des 10 instruments, à la fois pour des mesures *in situ* et de télédétection. SOLAR ORBITER permettra d'étudier la dynamique de la couronne solaire à une distance radiale de ~60 rayons solaires. L'orbite de SOLAR ORBITER rendra possible des périodes d'observation en phase avec la rotation solaire. Ceci permettra, pour la première fois, d'associer directement des observations à haute résolution spatiale d'événements à la surface solaire et dans la couronne avec des mesures *in situ* dans le vent solaire. Elle permettra d'étudier notamment les processus de

chauffage du vent solaire et, grâce à des périodes de rotation quasi-synchrones avec le Soleil, les processus d'accélération de particules énergétiques. Après les missions SoHO et ULYSSES, cette mission fédère l'ensemble des laboratoires de physique solaire et héliosphérique en France et en Europe.

On notera ici que les missions d'opportunité jouent un rôle très important pour la communauté et permettent d'engager des études complémentaires aux axes prioritaires de l'ESA. Ainsi, la France est le seul pays d'Europe à participer également au niveau instrumental à la mission SOLAR PROBE PLUS de la NASA, après réponse à l'appel d'offre émis en 2009. Cette mission, complémentaire de SOLAR ORBITER avec un lancement en 2018, est spécifiquement destinée à l'étude de la couronne et du vent solaire naissant par des mesures in situ très proches du Soleil. Les deux missions présenteront, de par leurs trajectoires respectives et leurs dates de lancement, un très fort potentiel de synergie scientifique. Sur les 8 à 9 années de phase opérationnelle des deux missions, un grand nombre de conjonctions (alignements, quadratures) permettront des observations simultanées de la couronne et du vent solaire à la fois in-situ par SOLAR PROBE PLUS et à distance par SOLAR ORBITER (avec SOLAR PROBE PLUS dans son champ de vue). La stratégie pour répondre aux questions fondamentales sur le chauffage de la couronne et l'origine du vent solaire passe par une mission d'exploration des régions de l'héliosphère interne aussi près que possible de la photosphère du Soleil. En complément de SOLAR ORBITER, la mission SOLAR PROBE PLUS permettra une avancée historique en pénétrant pour la première fois dans l'atmosphère de notre étoile (jusqu'à 9,5 rayons solaires) afin d'élucider les processus à l'origine du chauffage de la couronne et de l'accélération du vent solaire.

#### **4.2.2. BEPI COLOMBO**

La communauté est également fortement impliquée dans la mission BEPI COLOMBO vers Mercure qui conduit à une coopération étroite entre l'ESA, maître d'oeuvre du Mercury Planetary Orbiter (MPO, satellite stabilisé 3 axes sur une orbite polaire de 400 x 1600 km) et la JAXA, maître d'oeuvre du Mercury Magnetospheric Orbiter (MMO, satellite spinné sur une orbite polaire de 400 x 12000 km). MPO a pour objectif principal l'étude de la planète solide, tandis que MMO est destiné à l'étude de la magnétosphère de Mercure et du milieu interplanétaire. Les mesures plasma effectuées par BEPI COLOMBO vont fournir une opportunité unique d'analyse d'une magnétosphère dont les échelles spatiales et temporelles sont beaucoup plus petites que celles de la Terre et dont les conditions aux limites diffèrent radicalement (absence d'ionosphère, magnétopause à faible distance de la planète). De nombreux phénomènes concernant la structure et la dynamique de la magnétosphère ainsi que le transfert de masse et d'énergie du vent solaire seront explorés ou réévalués par rapport aux connaissances acquises à l'aide des observations de la sonde MESSENGER de la NASA (en orbite autour de Mercure depuis mars 2011). Pour comprendre le couplage du vent solaire avec la magnéto-exosphère et la surface de Mercure, MPO et surtout MMO emporteront des expériences faisant un diagnostic du plasma aussi complet que possible via la mesure du champ magnétique continu, la mesure du champ électromagnétique dans une large gamme de fréquence, et la mesure des fonctions de distribution ioniques et électroniques. La communauté participe à l'instrumentation embarquée à bord des deux sondes, le lancement étant aujourd'hui prévu en juillet 2016 pour une arrivée à Mercure en

2024. La mission BEPI COLOMBO contribuera en outre aux aspects «surveillance solaire» décrits ci-dessus.

#### **4.2.3. MAVEN**

La mission MAVEN (Mars Atmosphere and Volatile EvolutioN) de la NASA a décollé du centre spatial Kennedy à destination de Mars le 18 novembre 2013. Ses objectifs : étudier la haute atmosphère et l'ionosphère martiennes ainsi que leurs interactions avec le vent solaire. Les données récoltées par les différents instruments de MAVEN permettront de mieux comprendre les causes et les effets de l'échappement de l'atmosphère martienne et, ce faisant, de retracer l'histoire climatique de la planète. La communauté participe à la charge utile de MAVEN qui comprend un ensemble d'instruments cohérent dédié aux mesures « plasmas » (magnétomètre, sonde de Langmuir, analyseur d'ions et analyseur d'électrons, détecteur de particules solaires énergétiques, et analyseur de la composition d'ions thermiques et suprathermiques). Les principaux objectifs de MAVEN sont d'ordre planétologique mais cet ensemble instrumental permettra une étude approfondie de la petite magnétosphère induite de Mars, prolongeant et amplifiant ainsi les résultats obtenus par MarsExpress. On notera enfin que MAVEN fournira également à la communauté un autre point de mesure dans l'héliosphère, propice par exemple à l'étude de la propagation des CMEs.

#### **4.2.4. SWARM**

La mission multi-satellites SWARM pour sa part a été lancée le 22 novembre 2013. L'objectif scientifique principal de cette mission est la mesure précise du champ magnétique terrestre interne. Les trois satellites disposent à leur bord d'une instrumentation adaptée à ces mesures mais aussi à l'analyse des effets externes qui « parasitent » la mesure du champ interne. Ces effets "parasites" sont précisément ceux qui intéressent la communauté PNST, et la mission SWARM constitue ainsi une aubaine permettant d'obtenir des mesures précises de différents paramètres ionosphériques et thermosphériques. En particulier, les mesures des champs électrique et magnétique dans l'ionosphère qui seront réalisées, permettront d'appréhender l'électrodynamique du système magnétosphère-ionosphère. Un des objectifs auquel se prête bien la mission SWARM (de par le vol en formation des satellites et de par l'instrumentation embarquée) est la mesure des courants alignés avec le champ magnétique. Dans l'environnement spatial terrestre, ces courants alignés jouent un rôle crucial dans les couplages entre magnétosphère et ionosphère, et une partie non négligeable de l'énergie qui est transférée du vent solaire à la magnétosphère est dissipée dans l'ionosphère polaire via de tels courants. Les mesures de SWARM couplées aux simulations numériques permettront d'étudier la variabilité des courants alignés à petite échelle associés aux structures aurorales. Par ailleurs, avec leurs magnétomètres vectoriel et scalaire à haute résolution, les satellites SWARM seront précieux pour obtenir une description spatio-temporelle des courants alignés à grande échelle.

#### **4.2.5. TARANIS**

Dans le cadre du programme multi-latéral, la mission TARANIS est pour sa part la priorité de la discipline depuis les deux derniers colloques de prospective. Ce micro-satellite



est dédié à l'étude des transferts d'énergie impulsifs entre la haute atmosphère et l'ionosphère de la Terre, et à leur rôle dans le couplage entre ces deux régions. Le projet vise plus particulièrement la physique des TLE (Transient Luminous Events) et des TGF (Transient Gamma Ray Flashes) observés depuis les années 90 au sol, en avion, à bord de la navette spatiale ou de la station spatiale internationale, ou encore par des satellites. Le planning de TARANIS prévoit une livraison des différents instruments entre avril et septembre 2014. La phase Assemblage-Test-Intégration commencera à partir d'octobre 2014, et le satellite sera prêt au lancement en avril 2016. La date de lancement retenue est en novembre 2016 (lancement en piggy-back depuis Kourou sur la fusée Soyouz dédiée au satellite EarthCare de l'ESA). Après 6 mois de commissioning, les données seront mises à disposition de la communauté scientifique. Dans un premier temps, la durée de vie de la mission est de deux ans (support mission CNES) avec possibilité d'extension.

#### **4.2.6. Autres Missions**

Concernant la magnétosphère terrestre, la communauté reste fortement engagée dans les missions CLUSTER (ESA, lancé en 2000) et THEMIS (NASA, lancé en 2007). Pierre Angulaire du programme « Horizon 2000 » de l'ESA, CLUSTER est la première mission multi-satellite dans la magnétosphère terrestre, et cette mission a considérablement enrichi l'étude des processus fondamentaux dans les plasmas spatiaux (voir chapitres ...). La mission Magnetospheric Multi-Scale (MMS) de la NASA (lancement prévu en novembre 2014), pour sa part, est dédiée aux petites échelles. La communauté participe aussi à cette mission qui fournira des données à une cadence 100 fois plus élevée que celle de CLUSTER et qui sondera le milieu jusqu'à l'échelle électronique (~10-100 km). Ces mesures permettront une étude détaillée des processus plasmas à petite échelle (reconnexion magnétique, accélération impulsive, turbulence) et des structures transitoires (fines couches de courant, fronts de dipolarisation, chocs, filaments). A cet égard, on peut regretter, du fait de la non sélection de X-SCALE, l'absence de mission dédiée à l'étude combinée des processus plasmas aux trois échelles fondamentales (fluides, ioniques, électroniques).

Enfin, au cours de la période 2009-2013, on notera l'arrêt des missions DEMETER et PICARD, le lancement de JUNO (2011) qui permettra notamment l'étude des zones aurorales de Jupiter, la sélection de JUICE (mission L1 de l'ESA, lancement prévu en 2022) pour l'étude de l'environnement jovien et en particulier des satellites Callisto, Europe et Ganymède, ainsi que plusieurs propositions de missions par la communauté PNST, notamment : ALFVEN (étude des processus d'accélération en zone aurorale terrestre), TOR (étude de la turbulence dans le vent solaire), NITRO (étude des échappements d'azote des atmosphères planétaires). La communauté reste également engagée dans SOHO et dans STEREO pour l'étude de l'accélération des particules et la propagation des CMEs dans l'héliosphère (voir figure 1.2.1). Citons aussi le projet PROBA-3 dédié à l'étude de la couronne solaire et qui apportera des données nouvelles sur l'interface photosphère-couronne, la couronne magnétique et les phénomènes éruptifs tout en bénéficiant d'une synergie avec les observations simultanées sol et espace. On se référera au document de prospective du groupe SHM du CNES pour une description détaillée de ces différentes missions, en particulier celles d'opportunité qui joueront un rôle important dans les années à venir.

#### 4.2.7. Compétences instrumentales

L'instrumentation développée pour les missions spatiales constitue **un pan important de l'activité des laboratoires qui mobilise les équipes scientifiques et techniques sur plusieurs années**. Une liste (non exhaustive) des expertises complémentaires développées par les laboratoires est fournie ci-après (on se référera au document de prospective du groupe Soleil-Héliosphère-Magnétosphère du CNES pour des informations techniques sur ces instruments).

- CEA :
  - Sismographe pour hélio-sismologie (GOLF\_NG-SOHO)
  - Spectro et imageur X (STIX-SOLAR ORBITER, avec le LESIA)
  - Détecteurs X (STIX-SOLAR ORBITER)
  - Caméras et photomètres (MCP-TARANIS)
  
- CEA/IPGP :
  - Magnétomètre absolu et vectoriel (ASM)
  
- IAS :
  - Imageur et coronographe Lyman Alpha UV (LYOT)
  - Imageur solaire EUV (EUI)
  - Mesure de vitesses radiales par mesures spectrales (PHI-Solar Orbiter)
  - Spectro-imageur EUV à fente (LEMUR)
  - Projets d'imageurs EUV compacts (adaptés L5 ou hors écliptique)
  
- IRAP :
  - Analyseur électrons thermiques (SWEA-STEREO, MAVEN ; MEA-BEPI COLOMBO)
  - Analyseur vent solaire (SWA-SOLAR ORBITER)
  - Analyseur ions thermiques (HIA-CLUSTER)
  - Analyseur ions-électrons thermiques (AMBRE, AMBRE\_GEO)
  - Analyseur ions temps de vol (CODIF-CLUSTER)
  - Analyseur électrons et ions négatifs (PASTELS)
  - Détecteur solide électrons haute énergie (IDP, IDEE)
  - Détecteur de rayonnements X et gamma (XGRE-TARANIS)
  
- LATMOS :
  - Imageur UV pour exosphères planétaires (PHEBUS-BEPI COLOMBO)
  - Imageur Lyman-Alpha pour neutres interstellaires (SWAN-SOHO)
  - Composition ionique exosphérique de basse énergie (PICAM-BEPI COLOMBO)
  - Composition des neutres « exosphériques » (NIMEIS)
  - Antennes et capteurs électriques (IME-BF)
  
- LESIA :
  - Expériences radio et ondes plasmas (Wind-WAVES, STEREO-WAVES, CASSINI-RPWS, CLUSTER/STAFF-SA, BepiColombo/MMO/PWI/Sorbet, Solar Probe Plus/Fields, Solar Orbiter/RPW, JUICE/RPWI)

- LPC2E :
  - Sonde à impédance mutuelle (AM2P-BEPI COLOMBO, MIP-ROSETTA, MIME-JUICE)
  - Boucle haute fréquence (fusée CHARM)
  - Boucle de Rogowskii (fusée ACES)
  - Search-coil et pré-amplificateur (SOLAR ORBITER-RPW-SCM, SOLAR PROBE PLUS-SCM, VPM-SCM, IMM-TARANIS)
  - Antenne électrique HF et préamplificateur (TARANIS - instrument IME-HF)
  - Analyseur MF (TARANIS - analyseur MF-A d'IMM)
  - Interface Unit (TARANIS - Multiple EXperiment Interface Controller)- Mesure du champ électrique HF et de la densité électronique par sondeur à relaxation (WHISPER-CLUSTER)
  
- LPP :
  - Fluxmètres (CASSINI ; STAFF-CLUSTER, THEMIS, MMS ; DBSC-BEPI COLOMBO ; JUICE)
  - Analyseurs ions thermiques magnétiques (HYPERBOLOID-INTERBALL ; DYMIO-MARS96)
  - Analyseurs ions temps de vol (réflectron) (CAPS-CASSINI ; MSA-BEPI COLOMBO)
  - Analyseur plasma (IAP-DEMETER)
  - Détecteur pour analyseur de particules (DFMS-ROSETTA)
  - Récepteur basse fréquence (SOLAR ORBITER)
  - Sonde de Langmuir (ISL-DEMETER)
  
- ONERA/CNES :
  - Détecteur d'ions et électrons énergétiques (ICARE\_NG)
  
- ONERA/ISAE :
  - Accéléromètres classiques et compacts (Oscillateur à Quartz)

Il convient de souligner ici que **les développements instrumentaux exigent compétences et savoir faire qui ne peuvent être ponctuellement remplacés par des CDD**. La forte diminution des recrutements ces dernières années conduit en outre à un émiettement de la communauté PNST, et nombre de ces projets sont menés avec des équipes dont la taille devient critique.

### **4.3. Bases et services de données**

#### **4.3.1. CDPP**

Le CDPP (Centre de Données de la Physique des Plasmas, INSU/CNES/Université Paul Sabatier/Observatoire de Paris) est le centre d'archivage et de distribution des données *in situ* dans l'héliosphère, la magnétosphère terrestre ainsi que dans les environnements ionisés des planètes. Il rend ces données accessibles et exploitables par l'ensemble de la

communauté internationale. Le CDPP offre également des services permettant aux utilisateurs de visualiser les données, de faire des calculs, de rechercher et d'extraire des informations. Le CDPP a été labellisé comme Pôle national de distribution des données de physique des plasmas (SO5). Par ailleurs le CDPP est un service de référence associé au centre d'expertise régional OV-GSO (Observatoire Virtuel Grand Sud-Ouest).

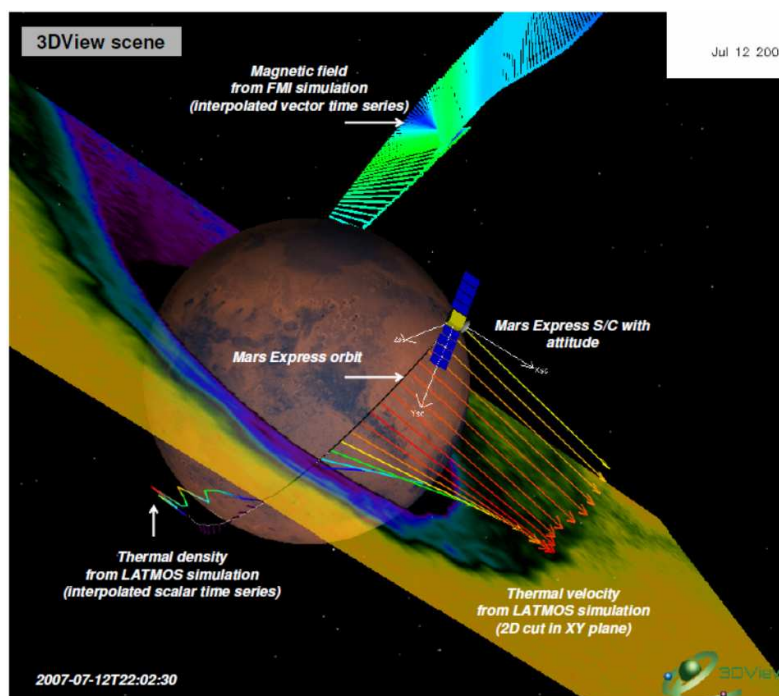
#### 4.3.1.1. Faits marquants

##### ☞ Développement des archives, de bases actives, et de produits de données

L'intégralité des données du satellite DEMETER est désormais accessible au CDPP, sur le SIPAD du CNES. Sur le site AMDA, l'offre de données planétaires a été étendue, en particulier pour Jupiter pour laquelle une base très complète a été mise en place en prévision de la mission JUICE.

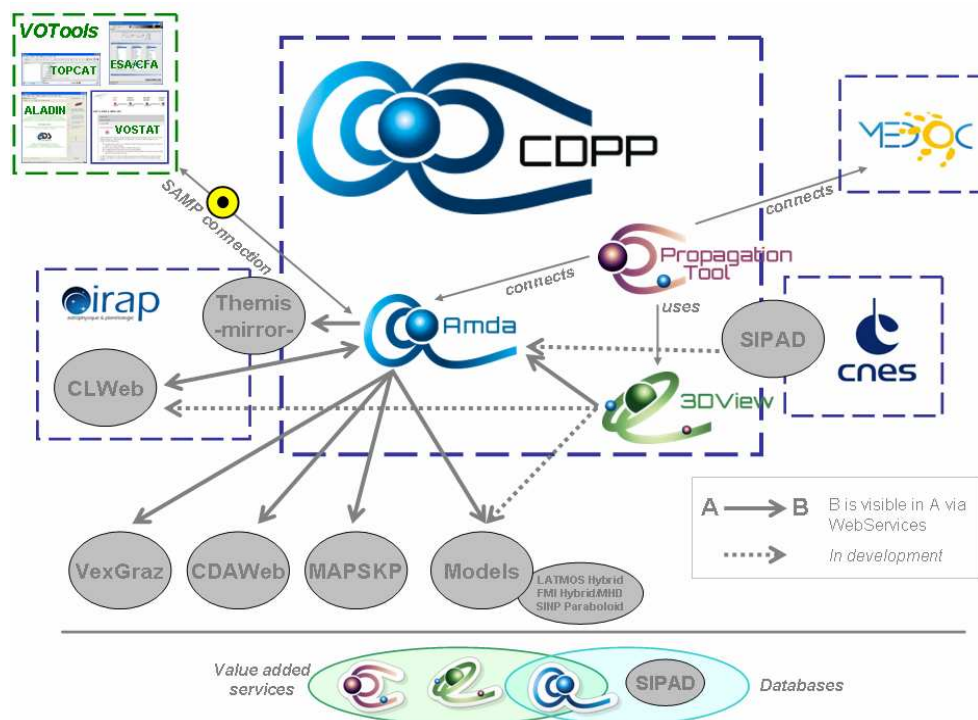
##### ☞ Développement de services à valeur ajoutée et des outils logiciels

Le CDPP a eu une action forte pour le développement d'outils d'aide à l'analyse. Ceci s'est concrétisé par exemple par la refonte complète de l'interface et du noyau de l'outil phare AMDA, le développement d'un nouvel outil de propagation (en partenariat avec MEDOC) permettant de relier perturbations solaires et mesures *in situ*, ou l'extension de 3DView à la visualisation de données d'observation et de modèles numériques (voir figure 4.3.1).



**Figure 4.3.1** : Scène 3DView montrant des observations et des simulations dans l'environnement martien le long de l'orbite de Mars Express.

Ces outils augmentent la gamme d'analyses scientifiques possibles, à savoir : recherche conditionnelle, classification, inter-comparaison observations / modèles numériques, visualisation 3D... Les connections entre outils sont facilitées par l'emploi de standards et protocoles discutés et définis dans le cadre de l'Observatoire Virtuel (web services, modèles de données, SAMP...). La figure 4.3.2 illustre cette communication entre outils et bases.



**Figure 4.3.2** : Bases de données et services accessibles à travers le CDPP.

#### ☞ Implication dans les projets de réseaux et d'observatoires virtuels

Le CDPP a poursuivi son action dans les projets européens Helio et EuroPlanet-RI et s'est engagé dans IMPEX en étant responsable de plusieurs Work Packages. Les travaux sur les modèles de données ont été menés jusqu'à leur implémentation effective dans des systèmes d'accès aux données (démonstrateur EPN-TAP basé sur l'IVOA, modèle IMPEX basé sur SPASE). Le CDPP a également eu une implication accrue dans les consortiums internationaux définissant les standards de l'Observatoire Virtuel (IVOA, IPDA, SPASE).

#### ☞ Implication dans les missions futures

Le CDPP s'est positionné dans la chaîne de distribution des données de plusieurs missions, avec en premier lieu SOLAR ORBITER pour lequel le CDPP sera le centre de distribution des données plasma SWA (instruments EAS du MSSL, et HIS et PAS de l'IRAP). Pour cette mission, le CDPP jouera également un rôle d'interface vis-à-vis du centre d'archivage de l'ESA. Le CDPP a une implication similaire dans la mission JUICE pour l'instrument onde RPWI.

#### 4.3.1.2. Perspectives

Le CDPP va poursuivre son action en se focalisant tout d'abord sur le lancement de la nouvelle version d'AMDA ainsi que sur celui du Propagation Tool, à travers un partenariat renforcé avec MEDOC et dans le cadre du projet FP7 Helcats. Un autre axe de développement consistera à accroître l'intégration des outils CDPP entre eux ainsi qu'avec ceux de l'IVOA. A moyen terme, une version étendue du Propagation Tool (le « Space Weather Tool ») sera proposée. Enfin, une priorité sera donnée à la préparation de l'accès aux données des prochaines missions (BEPI COLOMBO, SOLAR ORBITER, MAVEN, MMS, ROSETTA, JUNO, JUICE).

La stratégie du CDPP repose sur trois principes :

- privilégier les collaborations nationales (MEDOC, OV-GSO, demandes ANR...)
- participer aux projets européens favorisant le développement de l'Observatoire Virtuel, d'infrastructures, de services d'analyse de données et de comparaison observations/simulations ainsi que d'archivage
- participer aux projets spatiaux en tant que support pour la distribution des données et des services avec le soutien du CNES.

Au niveau national, développer une infrastructure distribuée en France serait bénéfique à tout point de vue, rassemblant dans un premier temps MEDOC et CDPP, puis étendue à BASS2000, SIIG et autre ressource nationale. Avec une telle infrastructure, les collaborations en France pour la diffusion et l'exploitation des données de SOLAR ORBITER seront à n'en pas douter facilitées.

La réussite d'IMPEX (via notamment l'ajout de nouvelles bases de données de modèles numériques) sera également cruciale. Ce projet constitue en effet une pierre angulaire pour le CDPP car il permet aux outils AMDA et 3DView d'être visibles et développés. Ce projet permet également d'utiliser et d'accroître les connaissances OV du CDPP (modèles de données, web services, protocoles), et d'accéder à une compétence pour un nouveau type de données : les simulations numériques. Les missions MMS, Solar Orbiter et plus généralement les missions planétaires nécessiteront en effet un soutien important en simulation pour l'analyse des données.

#### 4.3.2. MEDOC

MEDOC est un centre d'opérations et de données pour les missions spatiales solaires. Il est à ce titre labellisé « Pôle thématique national » pour la physique solaire, conjointement par le CNES, l'INSU et l'Université Paris-Sud. Il est localisé à l'IAS à Orsay. MEDOC ne met pas seulement à disposition des données mais aussi des outils et des produits dérivés de ces données (« produits à valeur ajoutée »). Il constitue ainsi un formidable outil au service de la production de résultats scientifiques. Les activités de MEDOC reposent notamment sur les travaux de l'équipe de physique solaire et stellaire de l'IAS, comme cela est illustré dans les figures ci-après. En termes de données, MEDOC met à la disposition de la communauté des données de plusieurs missions spatiales majeures, à savoir : SoHO (tous les instruments), TRACE, STEREO et SDO (instrument AIA). Les données de la mission PICARD sont également en cours d'intégration dans MEDOC. Une réflexion est par ailleurs entamée pour

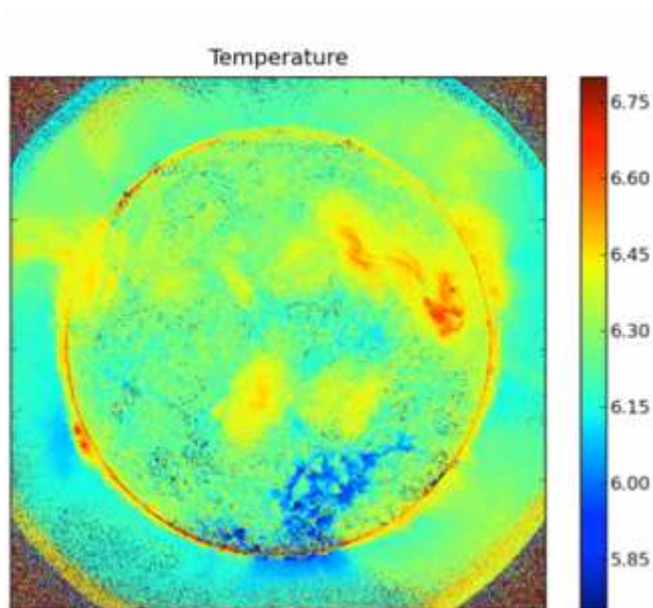
les instruments de la mission SOLAR ORBITER qu'il est souhaitable d'avoir à disposition à MEDOC.

Les données sont disponibles grâce à plusieurs interfaces (voir le site <https://idoc.ias.u-psud.fr/MEDOC>). Les données sont aussi directement disponibles à partir de programmes écrits en IDL et Python grâce à des clients spécifiques. En termes d'outils disponibles, certains concernent la visualisation comme par exemple l'outil FESTIVAL pour la visualisation combinée de données de plusieurs instruments (*Auchère et al.*, 2008). L'année 2013 a vu l'arrivée à MEDOC d'un autre outil de ce type, HelioViewer, qui permet également la combinaison de données d'origines variées (voir figure 4.3.3).



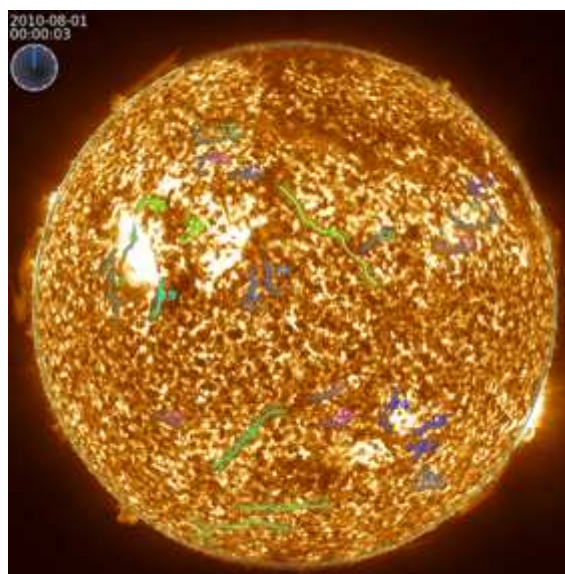
Figure 4.3.3 : L'outil Helioviewer à MEDOC.

D'autres outils disponibles à MEDOC concernent directement l'aide à l'analyse et l'interprétation des données (par exemple, code de transfert radiatif ou modèle de vent solaire). Les années 2012 et 2013 ont vu l'apparition et la mise à disposition de nouveaux produits dérivés des données. Par exemple, des cartes synoptiques du Soleil en extrême UV (instrument EIT/SOHO) sont accessibles à travers une interface permettant des recherches en longueur d'onde et en intervalle de temps. Plus élaboré, des cartes de température et de densité résultant d'une inversion des données obtenues à différentes longueur d'onde par l'imageur AIA/SDO, obtenues lors d'un travail de thèse à l'IAS (*Guennou et al.*, 2012). Un exemple est donné dans la figure 4.3.4.



**Figure 4.3.4 :** Carte de température disponible à MEDOC.

Un autre produit à valeur ajoutée est en préparation et sera mis à disposition pendant le premier semestre 2014, à savoir : un catalogue de filaments (observés en EUV) indiquant pour chaque filament ses caractéristiques globales (position des pieds, longueur, orientation...). Un exemple est donné dans la figure 4.3.5 (voir *Buchlin et al.*, 2012).



**Figure 4.3.5 :** Carte de filaments prochainement disponible à MEDOC.

Les partenaires naturels de MEDOC sont le CDPP et BASS2000. La collaboration avec BASS2000 se traduit pour l'instant par l'installation à MEDOC d'outils développés dans le cadre du projet européen HELIO (FP7), dans le but d'assurer la continuité du service par redondance. C'est le cas du Heliospheric Feature Catalog d'ores et déjà disponible à MEDOC. La collaboration avec le CDPP se fait principalement à travers l'outil Propagation Tool du CDPP et par la fourniture de films par MEDOC (le Propagation Tool permettant de relier l'état du Soleil à une perturbation observée ailleurs dans le système solaire). A l'avenir,



cette collaboration va s'intensifier avec la mission SOLAR ORBITER. Il s'agit en effet d'optimiser l'exploitation des données de cette mission en connectant les mesures *in situ* (spécialité du CDPP) avec celles obtenues par télédétection (spécialité de MEDOC). Une réflexion a débuté pour définir les outils dont la communauté a besoin pour l'analyse et l'interprétation des données des différents instruments de SOLAR ORBITER.

#### 4.3.3. BASS2000

L'OMP et le site de Meudon travaillent en étroite collaboration. Leurs données respectives sont complémentaires, ainsi que leur expertise. Ils se sont partagés les participations aux grands projets solaires internationaux. Le site de Tarbes a été directement impliqué dans la partie gestion des données du « Design Study » EST, et il est membre de Solarnet. Le site de Meudon s'est spécialisé dans l'Observatoire Virtuel et la définition de standards, avec notamment sa participation dans EGSO, HELIO, SOTERIA, CASSIS.

##### ☞ OMP

L'OMP archive et met à disposition les données de THEMIS et du coronographe et des imageurs Soleil entier CLIMSO au Pic du Midi. Il archive également les données du radiohéliographe de Nançay. L'OMP a décidé de l'arrêt progressif de l'activité de base de données solaires de Tarbes dans le cadre d'OV-GSO. Il prévoit de maintenir l'archivage des données THEMIS pour un temps à définir, et considère que la base de données CLIMSO fera encore partie des priorités du futur centre.

##### ☞ Site de Meudon

Meudon propose l'accès aux données du Soleil entier et aux données synoptiques (spectrohéliographe héliographe, tour solaire pour Meudon ; 3 images par jour pour RH, 1 spectre par jour pour DAM à Nançay ; 3 images CLIMSO dans chaque longueur d'onde et par jour pour le Pic du Midi). La période 2010-2013 a vu les évolutions suivantes :

- ajout des observations (H $\alpha$ , CaII) du spectro-héliographe de Coimbra (Portugal) en 2010.
- ajout des observations (H $\alpha$ ) de la lunette USET de Bruxelles en 2012.

Une grande partie de l'activité est liée au programme européen HELIO (terminé en novembre 2012) qui se traduit par la présence d'un « Heliophysics Feature Catalogue » à Meudon (filaments, protubérances, régions actives, trous coronaux, taches, types III, radio-émissions métriques, allant pour certains de 1996 à 2013). Ce catalogue est en cours de couplage avec les données anciennes utilisées pour la construction des cartes synoptiques de l'activité solaire. En 2014, les données synoptiques papier depuis 1919 seront saisies pour être intégrées et mises à disposition de la communauté, offrant ainsi près d'un siècle de données. L'ensemble des services HELIO est en cours d'installation dans le cadre de OV-Paris. Le nombre de pages web consultées en moyenne par an (hors moteurs de recherche) sur la période considérée est de l'ordre d'une dizaine de millions par an auxquelles s'ajoutent environ 15000 accès FTP par an. Les principaux pays utilisateurs sont : France, USA, Grande Bretagne, Suisse, Allemagne, Belgique, Russie, Italie.

#### 4.3.4. CERCLe

Le CERCLe (acronyme pour « Cycle, Eruptions et Rayonnement Cosmique au LESIA ») fournit des données et services liés à la surveillance de l'activité solaire. Ce groupe exerce la responsabilité scientifique des moniteurs à neutrons français (Terre Adélie et Iles Kerguelen, la responsabilité technique étant à la charge de l'IPEV). Cette responsabilité inclut la validation, l'archivage et la diffusion des données. Le CERCLe fournit des données de base pour la surveillance des doses d'irradiation reçues par le personnel de l'aviation civile française (collaboration DGAC, IRSN). Il fournit par ailleurs une prévision du cycle d'activité solaire pour l'orbitographie. Au niveau international, le CERCLe est l'un des moteurs du réseau NMDB ([www.nmdb.eu](http://www.nmdb.eu)), qui diffuse les données des moniteurs à neutrons européens et d'un nombre croissant de moniteurs non-européens (Etats-Unis, Mexique, Afrique du Sud).

Un succès majeur des dernières années a été la diffusion en temps réel (un jeu de données par minute) des mesures des deux moniteurs français (depuis 2010 et 2012, respectivement). Ces données sont utilisées pour l'étude de processus solaires (événements à particules relativistes) et des applications en météorologie de l'espace. Le CERCLe joue aussi un rôle d'expert (collaboration CNES, CLS, ONERA, Armée de l'Air, aviation civile). Au niveau recherche, les moniteurs à neutrons devraient continuer à jouer un rôle important en tant que détecteurs de particules très énergétiques accélérées dans les événements solaires. Un couplage des observations des moniteurs avec celles des satellites aux plus basses énergies devra être développé. Il constituera alors un complément précieux des détecteurs de particules de SOALR ORBITER.

#### **4.3.5. SIIG**

##### **4.3.5.1. Faits marquants**

Le Service International des Indices Géomagnétiques (SIIG) est un service de référence pour les indices d'activité géomagnétique reconnus par l'International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA). Le SIIG est une entité transverse, à cheval entre les communautés Terre Interne et Astronomie-Astrophysique (SO6). Le SIIG a les responsabilités suivantes :

- calcul et publication des indices d'activité magnétique aa (basé sur deux stations antipodales) et am (basé sur un réseau planétaire de plus de 20 stations) avec fourniture des valeurs "Quicklook" ("Provisional" et "Definitive") dans des délais aussi brefs que possible.
- mise à disposition (via un portail officiel) et archivage (conservateur officiel) des valeurs "Quicklook" ("Provisional" et "Definitive") des indices, de leur produits dérivés et des listes d'événements remarquables reconnus par IAGA pour constituer la base de données de référence.
- calcul et mise à disposition de nouveaux indices géomagnétiques (trial indices) pour leur dissémination.
- référence, conseil et expertise auprès des autres membres de IAGA pour tout ce qui a trait aux indices d'activité géomagnétique.

Ce faisant, le SIIG traite et manipule plus d'une trentaine de types de données différents issus de plus de 11 sites distants.

Les collaborations internationales du SIIG sont multiples, à savoir : cinq instituts collaborateurs en charge de la dérivation d'indices géomagnétiques spécifiques, noeuds du réseau Intermagnet (Global Intermagnet Nodes), et nombreux observatoires magnétiques. Depuis 2012, le SIIG est « membre régulier » du World Data System de l'ICSU. D'un point de vue structurel, le SIIG possède un "Advisory Board" nommé par le Comité exécutif de IAGA. Ce comité se réunit tous les deux ans lors des Assemblées de l'IAGA et définit la politique générale scientifique vis à vis des indices (par exemple, concernant l'acceptation de nouveaux indices). Le SIIG fait également partie du BCMT (Bureau Central du Magnétisme Terrestre) qui regroupe les services d'observations magnétiques français dans le domaine de la Terre Solide. A ce titre, il est évalué tous les deux ans par son Conseil Scientifique (les dernières évaluations ayant eu lieu en novembre 2011 et en octobre 2013), lequel examine le travail opérationnel du SIIG et définit sa politique structurelle générale.

#### **4.3.5.2. Perspectives**

La pérennité du SIIG et son potentiel de développement sont assurés par le transfert initié en 2012 du LATMOS (Guyancourt) vers l'EOST (Strasbourg). Sur le nouveau site du SIIG à Strasbourg, la refonte totale du site Web, des protocoles de transferts comme de mise à disposition des données, ainsi que des programmes de calculs des indices sont à présent en phase de tests intensifs avant un lancement officiel fin 2014. Du point de vue scientifique, les développements et études de nouveaux indices géomagnétiques avec de meilleures résolutions spatiale et temporelle sont réalisés en collaboration avec l'IRAP et l'IPAG couvrant ainsi les deux communautés utilisatrices. Des collaborations au sein de la communauté PNST ont également été initiées avec le CDPP pour une alimentation régulière de la base de données AMDA.

#### **4.3.6. IPODE**

La base de données IPODE (« Ionizing Particle ONERA DatabasE ») de l'ONERA est dédiée aux particules énergétiques (protons et électrons) des ceintures de radiation terrestres. Cette base de données couvre environ quatre cycles solaires (de mars 1967 jusqu'à nos jours) et recense environ 110 couples satellite/instrument. Les mesures de particules sont disponibles le long de diverses orbites dont, en particulier, l'orbite géostationnaire, l'orbite de navigation GPS, l'orbite basse et des orbites elliptiques. Les mesures peuvent être tracées sur le web à l'aide de l'outil IPSAT (Ionizing Particle in Space Analysis Tool ; voir le site <http://craterre.oncert.fr/ipsat/>). Cette base de données est actualisée automatiquement toutes les nuits. Les mesures des missions en cours sont mises à jour et disponibles très rapidement.

#### **4.3.7. APIS**

Les émissions aurorales planétaires sont contrôlées à des degrés divers par la pression dynamique du milieu interplanétaire. Elles offrent un traceur performant des CIRs et CMEs dans l'héliosphère. C'est dans ce but que le service APIS (<http://lesia.obspm.fr/apis/>) a été ouvert à la communauté en juillet 2013. Il s'agit ici d'une base de données de spectro-imagerie aurorale planétaire qui offre un libre accès à un ensemble de données de haut niveau pour environ 5000 observations de Jupiter, de Saturne et d'Uranus de 1997 à 2014. Il est hébergé à VO-Paris Data Centre, compatible OV (démonstrateur du protocole EPN-TAP

pour l'OV planéto). Ce service est interconnecté avec les projets HELIO, AMDA et Europlanet-RI.

## 4.4. Outils numériques

### 4.4.1. Modélisation et simulations numériques

La modélisation et la simulation numérique font partie intégrante de la physique des plasmas solaires et magnétosphériques. Les outils développés permettent de faire le lien entre différentes observations qui sont toutes limitées dans le temps, et de mieux appréhender les processus à l'œuvre. La physique des plasmas héliosphériques étant caractérisée par une multitude d'échelles (depuis les échelles fluides jusqu'aux échelles ioniques et électroniques), différents codes sont utilisés, à savoir :

- ◇ **des modèles multi-moments**, assimilables à une approche fluide dans les régions collisionnelles, qui sont utilisés pour permettre une interprétation conjointe des données spatiales (satellites magnétosphériques) et à partir du sol (radars ionosphériques). Ces modèles permettent de mieux caractériser les couplages dans le système thermosphère-ionosphère-magnétosphère, à l'image du modèle électrodynamique IMM dévolu à la magnétosphère interne ou la famille de modèles ionosphériques TRANSCAR qui décrit la dynamique du plasma ionosphérique le long des lignes de champ ainsi que le transport de ces lignes par la convection.
- ◇ **des codes MHD** utilisés notamment pour comprendre les éruptions solaires, les éjections de masse coronale, l'émergence et la reconnexion du champ magnétique, les processus de micro-chauffage coronaux, la génération et la turbulence du vent solaire. Ce type de codes est un complément indispensable aux observations qui ne permettent pas toujours de détecter le champ magnétique (par exemple dans la couronne) ou de suivre la dynamique turbulente du plasma aux petites échelles spatio-temporelles. Au niveau solaire, on peut citer les codes du CPhT (METEOSOL avec des méthodes implicites, MESHMHD avec des maillages non structurés, des solveurs de Riemann pour la capture de chocs), les codes du LUTH (explicites avec des méthodes de différences finies compactes en géométrie sphérique et des conditions aux limites spécifiques), du LESIA (explicites et couplés aux codes d'extrapolation décrits ci-après), du CEA (ASH avec une approximation anélastique pour la modélisation du magnétisme global de l'intérieur solaire) et le code TURBO utilisé par l'IAS et le LPP (code spectral, parallèle, adaptatif en temps et incluant l'effet Hall).
- ◇ **des codes d'extrapolation des champs magnétiques coronaux** (code BLFFF-FROMAGE et XTRAPOL-FEMQ notamment) utilisés pour analyser la géométrie du champ magnétique dans la couronne au-dessus des régions actives (par exemple celle mesurée par HINODE ou par THEMIS).
- ◇ **des codes à N-corps** qui s'inspirent des simulations de systèmes gravitationnels. Ce type de codes est adapté aux plasmas où les collisions jouent un rôle non négligeable.

De tels codes sont utilisés par exemple pour étudier le transport de chaleur dans le vent solaire.

- ◇ **des codes hybrides** dans lesquels les ions sont traités comme des particules et les électrons comme un fluide (avec ou sans masse). L'avantage de tels codes est de décrire des processus se produisant à des échelles plus petites que l'échelle fluide, approche nécessaire par exemple pour décrire les frontières de plasma comme la magnétopause ou l'interaction du vent solaire avec certaines exosphères (Mars, Titan, Mercure...).
- ◇ **des codes particuliers** qui permettent de suivre l'évolution des particules à toutes les échelles spatio-temporelles. De tels codes sont utilisés par exemple pour étudier le choc d'étrave en amont de la magnétosphère terrestre et les processus d'accélération associés, les processus d'accélération en zone aurorale, ou encore les interactions ondes-particules.
- ◇ **des codes « Vlasov »** qui décrivent un plasma sans collision et permettent d'aborder des problèmes de nature cinétique comme l'accélération du vent solaire en présence de distributions non Maxwelliennes ou la saturation de l'instabilité et la formation des structures « miroirs » dans la magnétosphère.

Les ressources utilisées varient beaucoup selon la nature des codes, les simulations numériques lourdes (par exemple MHD 3D) nécessitant l'utilisation de moyens spécifiques (GENCI par exemple). On notera que les codes MHD développés dans la communauté française ne permettent pas encore de modéliser l'ensemble de la chaîne des relations Soleil-Terre (en particulier l'interaction du vent solaire avec la magnétosphère) en raison de la très grande résolution spatiale requise pour la description du choc et de la magnétopause. Dans ce but, une nouvelle approche (MESHMHD) est en cours de développement, basée sur un maillage tétraédrique.

On notera enfin les **logiciels de visualisation 3D** utilisés pour l'exploitation des résultats de simulations MHD et leur extrapolation. Le développement de ce type de codes fait l'objet de recherches spécifiques. Le code TOPOTR par exemple offre la possibilité de calculer la topologie du champ magnétique et d'identifier les régions de reconnexion magnétique ou de formation de rubans d'éruptions solaires observés dans le visible et en EUV (points nuls, séparatrices, quasi-séparatrices). Le logiciel PARAVIEW est utilisé en turbulence MHD pour identifier, par exemple, les structures dissipatives.

#### ***4.4.2. Codes d'inversion de raies permettant l'interprétation des données***

La communauté PNST développe par ailleurs des codes de transfert radiatif (transfert polarisé en particulier) et d'inversion de raies optiques (e.g., code DEM de *Guennou et al.*, 2012). Ces codes sont utilisés notamment pour l'exploitation des données du télescope THEMIS et pour la préparation du projet européen EST. En effet, l'obtention de données spectro-polarimétriques de bonne qualité n'est pas la seule condition pour obtenir des mesures fiables des champs magnétiques à la surface du Soleil (ou d'autres étoiles). Des controverses récentes (par exemple sur la valeur et/ou sur l'orientation du champ

magnétique du Soleil « calme ») ont mis en évidence qu'une méthode insuffisamment précautionneuse d'inversion des données spectro-polarimétriques de raies photosphériques pouvait fausser les diagnostics. Par ailleurs, un très grand nombre de raies spectrales (en particulier, les raies chromosphériques) sont difficilement inversables pour obtenir la valeur du champ magnétique et son orientation. La capacité de la communauté à effectuer un tel diagnostic doit progresser significativement dans la perspective des télescopes de grande ouverture ATST ou EST. Le télescope THEMIS peut y contribuer de par sa capacité multi-raies et son fonctionnement dans le visible et le proche IR. Les directions de recherche sont les suivantes :

- inversion des raies photosphériques (Soleil "calme", pénombres et points brillants dans les ombres)
- inversion dans les protubérances et filaments
- inversion des raies chromosphériques.

#### **4.4.3. Simulations « data driven » et assimilation de données**

Un fait nouveau en matière d'outils numériques est le développement rapide des simulations dites « data-driven » qui assimilent progressivement des paramètres observés, qu'il s'agisse par exemple d'éruptions solaires ou du cycle solaire de 11 ans. En effet, une quantité très importante de données solaires est aujourd'hui produite quotidiennement (le seul satellite SDO produit par exemple 2 To/jour) et il est nécessaire de développer des modèles intégrant ces observations, comme cela se fait en météorologie depuis de nombreuses années. Il existe plusieurs niveaux de développement de tels outils, du plus simple « data-nudging » où un terme de relaxation vers les données est ajouté aux équations, à des procédures séquentielles du type "filtre de Kalman" ou variationnel et à une approche plus globale. Des simulations de ce type ont été menées à la fois pour la dynamo solaire et pour la physique des régions actives et des éruptions solaires.

## 5. BILAN ADMINISTRATIF ET FINANCIER

### 5.1 Structure et fonctionnement

Le Programme National Soleil-Terre (PNST) est un programme de la division Astronomie-Astrophysique de l'INSU, créé en 1998. Le PNST est doté d'un directeur, d'un président et d'un Conseil Scientifique (CS), tous nommés par l'INSU. Pour la période 2010-2013, le directeur était Dominique FONTAINE (LPP) jusqu'en mars 2012, puis Dominique DELCOURT (LPP) à partir d'avril 2012. Pendant cette période, le CS était présidé par Sébastien GALTIER (IAS) et constitué des membres suivants :

APPOURCHAUX, Thierry (IAS)  
AULANIER, Guillaume (LESIA)  
BOURDARIE, Sébastien (ONERA)  
BRUN, Allan Sacha (CEA)  
CORBARD, Thierry (LAGRANGE)  
GENOT, Vincent (IRAP)  
ISSAUTIER, Karine (LESIA)  
KLEIN, Ludwig (LESIA)  
KRETZSCHMAR, Matthieu (LPC2E ; depuis janvier 2013)  
LEBLANC, François (LATMOS)  
LOPEZ-ARISTE, Arturo (THEMIS-UPS)  
MAZELLE, Christian (IRAP)  
MOTTEZ, Fabrice (LUTH)  
PALETOU, Frédéric (IRAP ; démissionnaire en décembre 2012)  
PITOUT, Frédéric (IRAP)  
SAVOINI, Philippe (LPP)

Les laboratoires dont tout ou partie des thématiques de recherche relèvent du PNST, sont les suivants :

CEA, Saclay et Bruyères  
IAP, Paris  
IAS, Orsay  
IPAG (ex-LPG) Grenoble  
IPG, Paris  
IRAP (ex-CESR, ex-LATT), Toulouse  
LAGRANGE (ex-CASSIOPEE, ex-FIZEAU), Nice  
LAM, Marseille  
LATMOS, Guyancourt  
LESIA, Meudon  
LPC2E, Orléans  
LPP, Palaiseau  
LUTH, Meudon  
ONERA, Toulouse  
THEMIS-UPS, Toulouse

Les thématiques du PNST présentent des interfaces avec d'autres programmes (voir §3), et des membres du CS jouent le rôle de correspondant auprès de ces programmes (F. Leblanc pour le PNP et S. Brun pour le PNPS) pour faciliter l'échange d'information et la coordination de certaines actions. Le CS du PNST invite à ses réunions :

- les représentants de l'INSU
  - Jean-Marie HAMEURY (DSA ; jusqu'en septembre 2012)
  - Denis MOURARD (DSA ; depuis octobre 2012)
  - Chantal LECOCQ (chargée de gestion)
  - Eric QUEMERAIS (chargé de mission à la division Astronomie-Astrophysique de l'INSU, LATMOS ; jusqu'en décembre 2012)
  - Philippe LOUARN (chargé de mission à la division Astronomie-Astrophysique de l'INSU, IRAP ; depuis janvier 2014)
- les responsables du groupe "Soleil-Héliosphère-Magnétosphères" (SHM) au CNES :
  - Jean-Yves PRADO (responsable thématique, CNES)
  - Milan MAKSIMOVIC (président du groupe SHM, LESIA ; jusqu'en janvier 2012)
  - Thierry DUDOK DE WIT (président du groupe SHM, LPC2E ; depuis février 2012)

Le CS du PNST invite également des chercheurs pour des présentations sur des sujets spécifiques devant faire l'objet de recommandations.

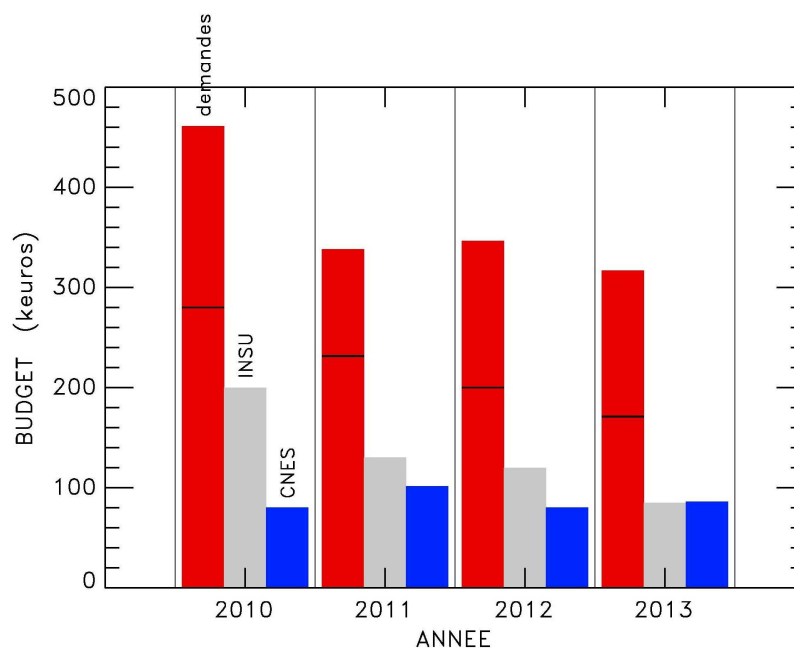
Le CS du PNST se réunit deux à trois fois par an en séance plénière ou par téléconférence. Il examine la politique scientifique du programme. Il entreprend une veille scientifique des grands programmes internationaux au sol ou dans l'espace dans le domaine des relations Soleil-Terre. Il entreprend également un suivi des instruments au sol intéressant la communauté (THEMIS, RadioHéliographe de Nançay, instruments solaires du pic du Midi, EISCAT, SuperDARN) et des centres de données concernés par ses activités sol ou spatiales (BASS2000, CDPP, MEDOC). Il fournit en outre une expertise dans son domaine de compétences auprès des instances. Statutairement, les membres du Conseil Scientifique du PNST sont également membres du Conseil National Français du SCOSTEP (Comité Scientifique de la Physique des Relations Soleil-Terre), comité interdisciplinaire de l'ICSU (Comité International des Unions Scientifiques).

## 5.2 Budget

Le budget du PNST provient d'une part de l'INSU (division Astronomie-Astrophysique), d'autre part du CNES comme indiqué dans la figure 5.1. Alors qu'elle était relativement stable pendant la période 2006-2009, la **dotation de l'INSU a régulièrement et très significativement décliné au cours de la période 2010-2013**, passant de 200 k€ en 2010 à 85 k€ en 2013. La dotation CNES, pour sa part, était à peu près constante (s'élevant à 80 k€, à l'exception de 2011 où elle était de 100 k€). Ces crédits sont utilisés pour :

- le financement d'actions proposées dans le cadre de l'AO annuel
- le financement des centres de données CDPP et BASS2000 (jusqu'en 2013 ; voir ci-après)
- la gestion à proprement parler du PNST.



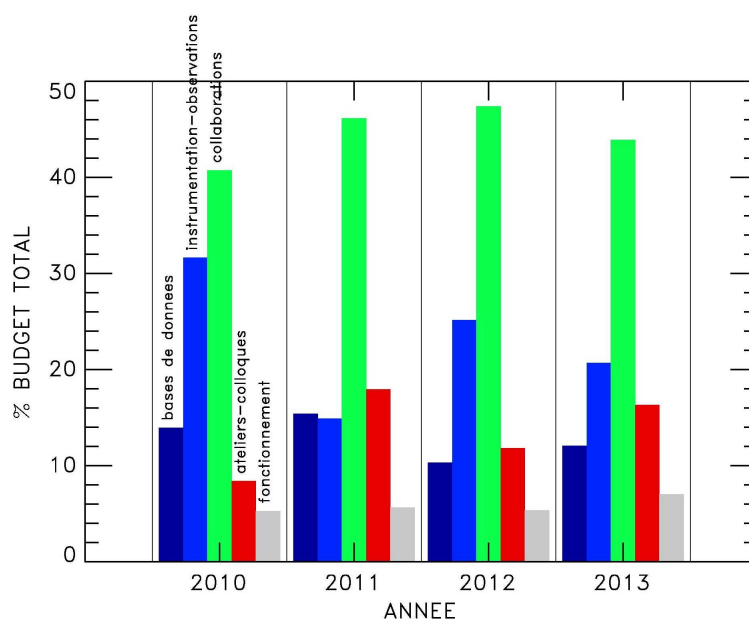


**Figure 5.1** : Evolution du montant total des demandes (en rouge) et de la dotation PNST (INSU en gris, CNES en bleu) pour la période 2010-2013. Les segments en noir indiquent le montant total de la dotation.

La Figure 5.2 montre la répartition du budget PNST, à savoir : centres de données (codées en bleu foncé), fonctionnement (en gris), et projets, eux-mêmes divisés en trois catégories (instrumentation-observation en bleu clair, collaborations en vert, et ateliers-colloques en rouge). Cette figure indique que :

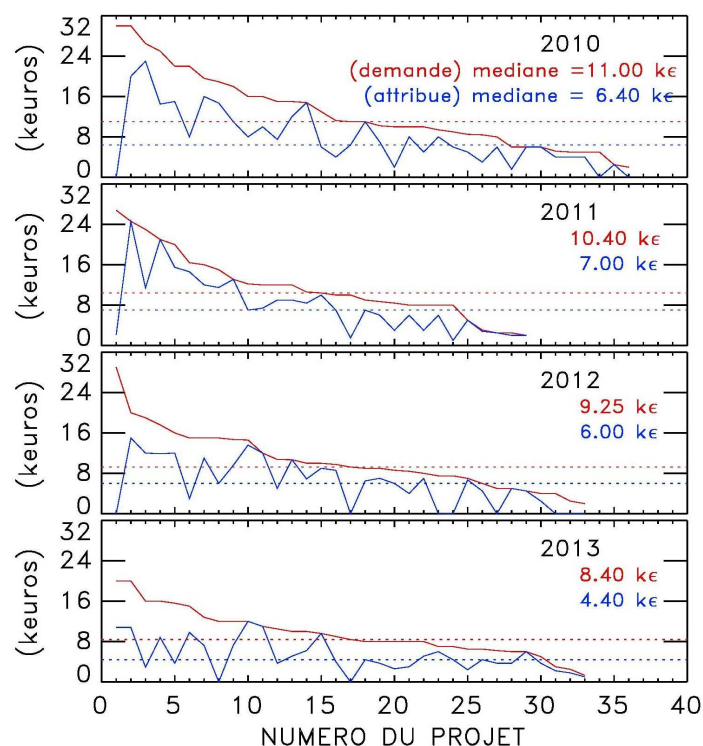
- Le financement des projets représente de 80 à 85% du budget du PNST. La liste détaillée de ces projets est fournie en Annexe A.
- Une grande partie (environ la moitié) des projets porte sur le développement de collaborations (analyse de données, simulations, travaux théoriques...) tandis que l'autre moitié se répartit entre soutien à l'instrumentation ou aux observations, et organisation d'ateliers ou de colloques (y compris colloque du PNST). De tels ateliers sont indispensables pour souder et structurer la communauté. On notera ici que les soutiens à SuperDARN et au radiohéliographe de Nançay font l'objet de demandes annuelles au PNST et qu'un financement récurrent de l'INSU à ces instruments serait approprié.
- Pour la période 2010-2013, le financement des centres de données CDPP et BASS2000 varie légèrement d'une année à l'autre, mais ce financement représente en moyenne 10-15% du budget du PNST. En 2012, une convention a été passée entre UPS et INSU pour pérenniser le financement de ces deux centres, les montants figurant dans cette convention correspondant à ceux demandés en 2011 (à savoir : 20 k€ pour le CDPP et 16,4 k€ pour BASS2000). En 2013, le financement du CDPP et de BASS2000 par le biais de cette convention n'a pu être assuré, et les montants alloués par le PNST ont été respectivement de 11 k€ et 9,6 k€ comme en 2012.
- La gestion du PNST à proprement parler représente de 5 à 7% du budget. Ces crédits sont utilisés pour les frais de déplacement des membres du CS, pour des

présentations ponctuelles dans des colloques (e.g., présentation du PNST au colloque de la SF2A), ou des compléments de financement des projets.



**Figure 5.2 :** Répartition du budget PNST en fonction du type d'actions (codé en couleurs) pour la période 2010-2013.

La figure 5.3 montre l'évolution des demandes et des attributions pour les quatre années écoulées (de haut en bas). Comme mentionné ci-dessus (voir figure 5.1), le budget du PNST a considérablement diminué pendant cette période (réduction de ~58% de la dotation INSU), mais le nombre et le montant total des demandes sont restés à peu près constants (de l'ordre de 320 k€). Il en résulte un **facteur de pression croissant (passant de 1,65 en 2010 à 1,85 en 2013) et des montants alloués plus faibles**, le nombre d'actions non retenues chaque année étant à peu près identique. Le fait que le nombre de demandes reste à peu près constant au fil des ans suggère que l'AO PNST garde pour le moment son attractivité en dépit de financements moindres. Cette évolution est particulièrement visible si l'on considère le montant médian des demandes et des financements attribués. En 2010, la demande médiane était de 11 k€ avec un financement médian de 6,4 k€. En 2013, cette demande médiane est passée à 8,40 k€ avec un financement médian de 4,4 k€. Plus précisément, en 2013, 13 projets ont reçu un financement inférieur ou égal à 4 k€. Si le budget du PNST et le nombre de demandes restent à ce niveau, il conviendra de s'interroger sur le processus de sélection, à savoir : moins de projets financés mais à un niveau significatif, ou davantage de projets avec financement à minima pour chacun d'eux. Ici, il convient toutefois de garder à l'esprit que nombre de demandes faites au PNST visent à pallier le manque de moyens des laboratoires.



**Figure 5.3 :** Montants des demandes (en rouge) et montants attribués (en bleu) de 2010 à 2013 (de haut en bas). Les valeurs à droite dans chaque panneau indiquent les valeurs médianes (demandées et attribuées).

Enfin, le tableau 5.1 résume les demandes et attributions pour les quatre années écoulées. Ce tableau fait apparaître un facteur de pression passant de 1,46 en 2011 à 1,85 en 2013.

	2010	2011	2012	2013
<b>Dotation INSU</b>	200 k€	130 k€	120 k€	85 k€
<b>Dotation CNES</b>	80 k€	101,5 k€	80 k€	86 k€
<b>Total dotation</b>	280 k€	231,5 k€	200 k€	171 k€
<b>Nombre demandes</b>	36	29	33	33
<b>Total demandes</b>	461,24 k€	338,26 k€	346,35 k€	316,9 k€
<b>Facteur pression</b>	1,65	1,46	1,73	1,85

**Tableau 5.1 :** Résumé des dotations et demandes pour la période 2010-2013.

### 5.3 Ressources humaines

A l'occasion de son renouvellement, le conseil scientifique du PNST a lancé une vaste enquête pour recenser le nombre de chercheurs, enseignants-chercheurs, post-doctorants et thésards présents dans les 15 laboratoires relevant en partie du PNST. Il ressort de cette enquête que la communauté PNST comprend 241 chercheurs dont 123 permanents de moins de 65 ans, 35 émérites et 83 non permanents. Nous présentons ci-après les résultats obtenus.

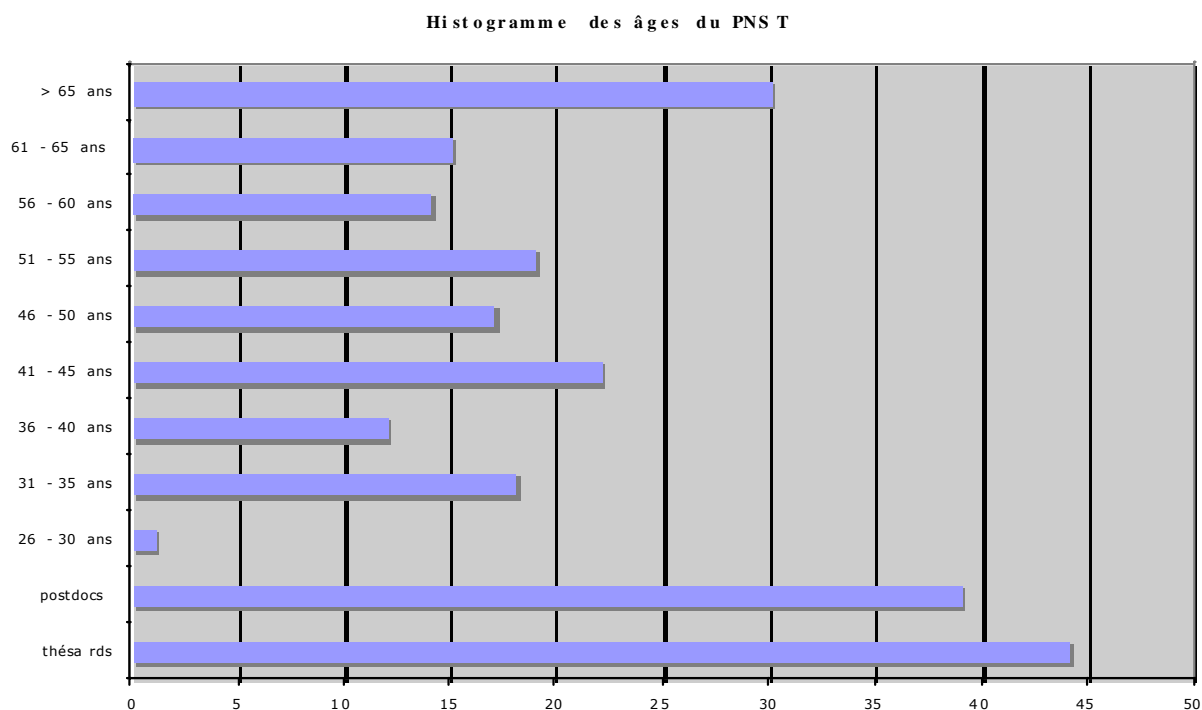


Figure 5.4 : Histogramme du personnel relevant du PNST.

La figure 5.4 montre l'histogramme des âges des chercheurs permanents du PNST (à la date du 31 décembre 2013). Apparaissent également dans cette figure les post-doctorants et thésards sans distinction d'âge pour souligner que le vivier de jeunes chercheurs reste important dans notre communauté. Ce vivier est en effet comparable à celui recensé pour la période 2006-2009. En revanche, la figure 5.4 met en évidence une nette dérive de l'histogramme vers le haut, avec une trentaine de chercheurs émérites. Malgré les recrutements récents, **la moyenne d'âge des chercheurs du PNST est désormais de plus de 52 ans**. Dans tous les laboratoires, on note une implication de chercheurs de plus en plus jeunes dans les grands projets de la discipline, et ceci n'est pas sans danger puisque cette implication se fait au détriment de l'activité scientifique à proprement parler de ces jeunes chercheurs (et par suite de leur laboratoire).

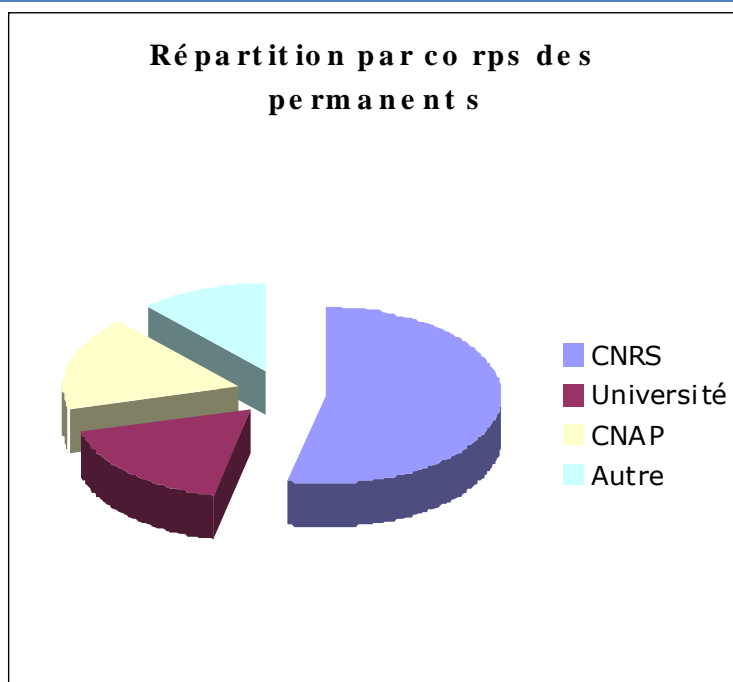


Figure 5.5 : Répartition par corps des permanents.

La figure 5.5 qui montre la répartition par corps des permanents place toujours le CNRS (section 17) en position dominante avec environ 53% de l'effectif. L'Université (section 34 du CNU) et le CNAP (Astronomie) ont maintenant autant de membres et constitue chacun 18% de l'effectif. Les autres statuts (CEA et Observatoire) représentent 11% des chercheurs.

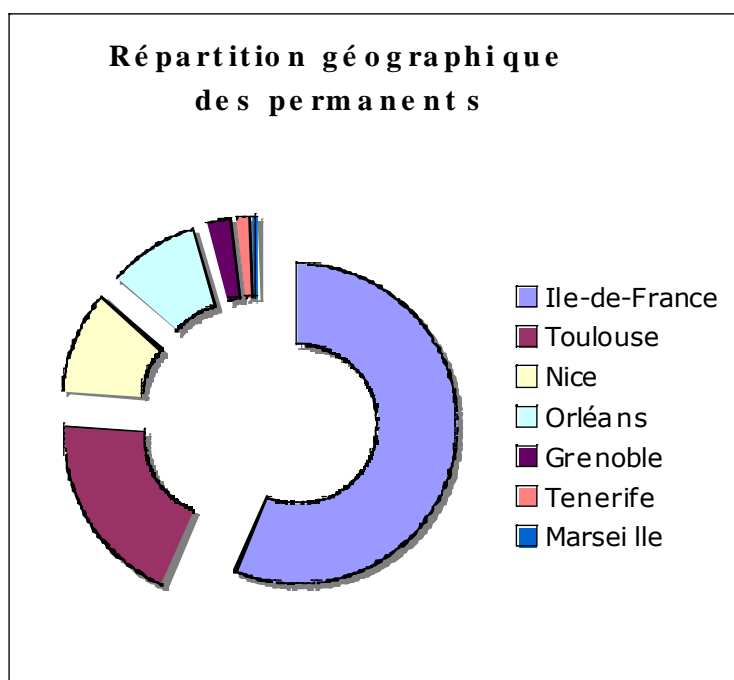
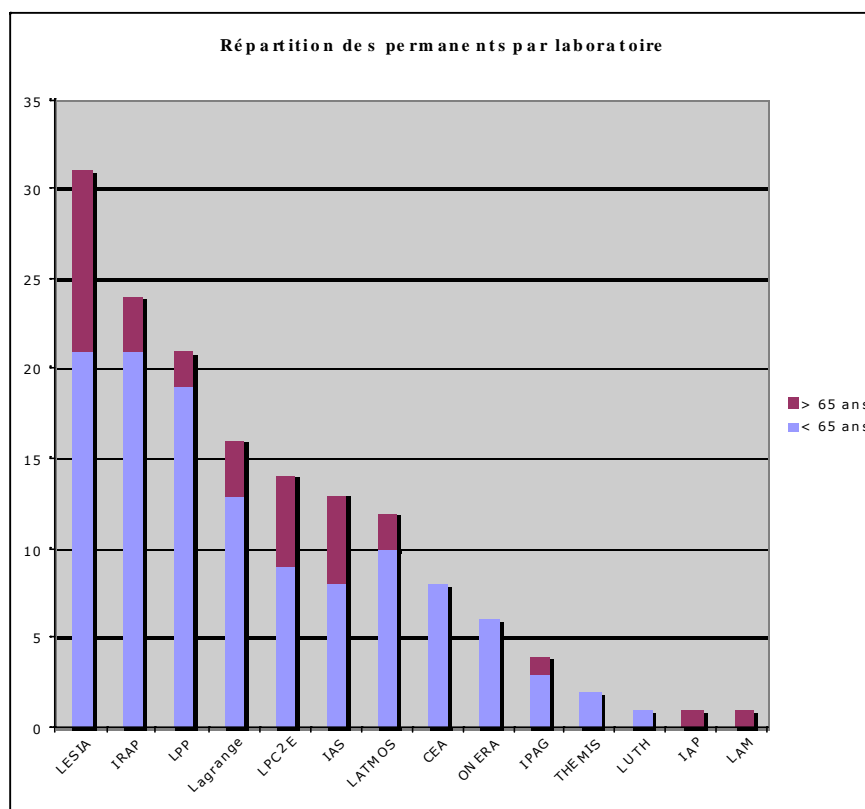


Figure 5.6 : Répartition géographique des permanents.

La figure 5.6 qui montre la répartition géographique des permanents, révèle une forte domination de la région parisienne qui regroupe 56% de l'effectif du PNST. En province, Toulouse est le site le plus important avec 20% de l'effectif, suivi de Nice (10%) et d'Orléans (9%). Le reste de la communauté est réparti sur Grenoble, Tenerife et Marseille (avec au total 5% de l'effectif).

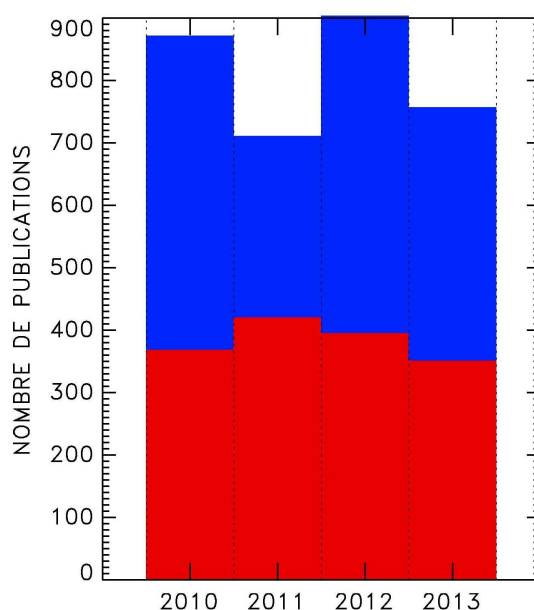


**Figure 5.7 :** Répartition des chercheurs permanents par laboratoire.

La répartition des chercheurs permanents (incluant les émérites) par laboratoire est décrite dans la figure 5.7. Cette figure indique que le LESIA est le laboratoire où l'activité du PNST est la plus fortement implantée, avec 31 chercheurs permanents répartis en deux pôles (pôle solaire et pôle plasma). Viennent ensuite l'IRAP (24 chercheurs) et le LPP (21 chercheurs). Les laboratoires LAGRANGE, LPC2E, IAS et LATMOS suivent avec 12 à 16 chercheurs. On peut également relever un nombre important d'émérites à l'IAS et au LPC2E. Les autres laboratoires sont de taille plus modeste avec moins de 10 chercheurs (CEA, ONERA, THEMIS, LUTH, IAP et LAM).

## 5.4 Bibliographie

L'évolution du nombre de publications de la communauté PNST au cours de la période 2010-2013 est illustrée dans la figure 5.8. Au total, 1538 articles ont été recensés dans des revues à comité de lecture, et 1705 dans d'autres revues (source NASA/ADS Metrics Summary, 13 mai 2014). Ces chiffres sont globalement comparables à ceux indiqués dans le bilan 2006-2009. Remarquons que de nombreuses collaborations existent au sein du PNST et qu'il n'est donc pas pertinent de réduire cette information à un peu moins de deux articles par an et par chercheur PNST (242 chercheurs recensés pour un peu moins de 400 articles par an dans des revues à comité de lecture).



**Figure 5.8** : Nombre de publications PNST de 2010 à 2013 avec comité de lecture (rouge) ou sans comité de lecture (bleu).

La communauté PNST est également engagée dans plusieurs projets ANR et FP7. La liste en est fournie en Annexe B.

## 6. CONCLUSIONS

Le Programme National Soleil-Terre (PNST) de la division Astronomie-Astrophysique de l'INSU est centré sur l'étude de l'atmosphère solaire, des relations Soleil-Terre et de l'environnement ionisé de la Terre. Ce programme inclut également l'étude des magnétosphères planétaires qui permet d'enrichir notre compréhension des processus physiques à l'œuvre.

Les thématiques du PNST couvrent l'ensemble des questions actuelles sur les environnements plasmas du Soleil et de la Terre. Il s'agit d'une part de comprendre des processus physiques, à savoir :

- la génération et le transport du champ magnétique du Soleil
- le couplage entre différentes régions de plasma
- les processus impulsifs et éruptifs de conversion d'énergie et du transfert d'énergie aux différentes échelles, la caractérisation de la turbulence et des processus d'accélération de particules à de hautes énergies.

Il s'agit d'autre part de développer notre compréhension du système Soleil-Terre dans son ensemble, à savoir :

- l'effet du vent et de l'activité solaires sur l'environnement plasma de la Terre (magnétosphère, ionosphère)
- les couplages de différents environnements "plasma" entre eux et également avec l'atmosphère neutre
- l'interaction entre Héliosphère et milieu interstellaire.

Ces différentes thématiques sont largement partagées par la communauté internationale. Elles figurent notamment dans le *Decadal Report on Solar and Space Physics* (US National Academy of Sciences) pour la période 2013-2022 et, au niveau Européen, dans la Question 2 ("How does the solar system work ?") identifiée dans le programme Cosmic Vision de l'ESA *Space Science for Europe 2015-2025*. Soulignons le lien qui y est établi avec les interrogations sur l'origine et le développement de la vie : "To characterise completely the conditions needed to sustain life, especially in an evolved form, we must therefore understand the solar magnetic system, its variability, its outbursts in large solar eruptions and the interactions between the heliosphere and planetary magnetospheres and atmospheres..."

Les grandes questions au cœur des activités du PNST portent donc naturellement sur les mécanismes fondamentaux dans les plasmas astrophysiques. **L'héliosphère est en quelque sorte un laboratoire astrophysique unique, pour lequel nous pouvons disposer de mesures in situ ainsi que d'observations à haute résolution spatiale et temporelle.** Au sein de ce programme, les grandes questions ci-dessus sont abordées d'une part à l'aide de moyens d'observation au sol et dans l'espace, d'autre part à l'aide de travaux théoriques, de modélisation ou de simulations numériques principalement centrés sur la physique des plasmas.

Les thèmes du PNST sur les relations Soleil-Terre conduisent à des intérêts communs avec la physique stellaire et avec les environnements d'autres planètes. L'étude des



magnétosphères planétaires permet en effet d'enrichir notre compréhension des processus plasmas à l'œuvre dans le système Soleil-Terre. Ce sont souvent les mêmes équipes qui travaillent sur les magnétosphères de la Terre et d'autres planètes. Les études comparatives avec des étoiles autres que le Soleil ont également un rôle important pour les recherches menées au sein du PNST sur l'origine de l'activité solaire. Notons d'autre part que la météorologie de l'espace (autrement dit, l'étude de la réponse du système magnétosphère-ionosphère-thermosphère terrestre à l'activité du Soleil) constitue une extension naturelle des activités du PNST, qui inclut la coopération avec des utilisateurs en dehors de la recherche. Le périmètre des activités du PNST est donc plus large qu'auparavant, mais ces activités restent centrées sur l'étude des relations Soleil-Terre, et il n'y a pas lieu de redéfinir les contours du programme.

Le PNST s'appuie sur une approche coordonnée de plusieurs communautés (Soleil, vent solaire, magnétosphère, ionosphère), réunissant différentes techniques d'observation et de modélisation. Cette approche a accompagné les grands développements de la discipline au niveau international, notamment les projets fédérateurs comme SOHO, STEREO, SOLAR ORBITER, SOLAR PROBE PLUS. Il était souligné lors du précédent exercice de prospective qu'il existait une bonne coordination de la communauté ainsi qu'une forte reconnaissance au niveau international. Ces deux points forts restent d'actualité avec toutefois quelques nuances. La communauté PNST a incontestablement une identité forte, et les nombreux ateliers organisés ou la participation importante aux colloques nationaux qui ont été organisés (Palaiseau, 2010 ; Lalonde des Maures, 2012 ; Sète, 2014) attestent une bonne coordination. Il faut souligner par ailleurs un nombre significatif de projets ANR et de participations aux projets européens. On notera néanmoins un émiettement des équipes engagées dans les projets, comme souligné ci-après. La forte reconnaissance de la communauté PNST au niveau international est, elle aussi, incontestable avec de très nombreuses collaborations scientifiques et techniques, ainsi que des sollicitations à participer aux grands projets internationaux. Dans le domaine de l'instrumentation spatiale, la communauté française a notamment une compétence reconnue dans la réalisation de détecteurs de particules, de capteurs électriques, magnétiques et radio, en spectroscopie et en imagerie UV-EUV, ou encore en coronographie. Cette compétence se traduit par une implication des laboratoires français à des niveaux de responsabilité importants par exemple dans les grands projets de l'ESA (SOHO, CLUSTER, BEPI COLOMBO, SOLAR ORBITER, JUICE...) et de la NASA (THEMIS, STEREO, MMS, SOLAR PROBE PLUS...). Dans le domaine de l'instrumentation au sol, les compétences de la communauté française sont également reconnues, par exemple en spectro-polarimétrie optique (téléscope THEMIS), en interférométrie et spectrographie radio solaire (NRH et spectrographes de Nançay) ou encore dans les radars ionosphériques. On notera par ailleurs l'excellence des centres de données CDDP et MEDOC, comme en témoignent le nombre d'accès enregistrés et l'intérêt que ces centres présentent pour le programme Space Situational Awareness (SSA) de l'ESA orienté vers la météorologie de l'espace. Parmi les points forts, notons enfin l'ouverture du PNST vers d'autres environnements planétaires pour enrichir notre compréhension des processus à l'œuvre dans les plasmas, ainsi que des interactions nouvelles avec les plasmas de laboratoire et de fusion.

Concernant les points faibles du PNST, il était relevé lors du précédent exercice de prospective que la communauté PNST était affectée par de nombreux départs à la retraite et

un manque criant de personnel ITA permanent. Si cette difficulté structurelle ne se limite pas à la seule communauté PNST, elle y prend un tour critique. Par exemple, les développements en instrumentation spatiale mobilisent les équipes sur de nombreuses années, exigeant compétences et savoir faire qui ne peuvent être ponctuellement remplacés par des CDD. La forte diminution des recrutements conduit en outre à une réduction importante de la taille des équipes engagées dans les projets. On notera comme autre point faible que la communication sur les thématiques du PNST pourrait être davantage développée, aussi bien pour le recrutement de doctorants en provenance des écoles doctorales d'Astronomie-Astrophysique que pour le grand public (concernant par exemple les aspects sociétaux des relations Soleil-Terre).

Le PNST a favorisé l'évolution de recherches indépendantes sur les différents plasmas du système solaire vers une recherche coordonnée du système Soleil-Terre. Cette stratégie est clairement celle de la communauté internationale, comme en témoigne le développement de la mission SOLAR ORBITER au niveau européen ou le *Decadal Report on Solar and Space Physics Physics* (Etats-Unis) pour la période 2013-2022 quand il préconise d'étudier le système Soleil-Terre-Héliosphère dans son ensemble. La communauté française, avec le soutien de l'INSU et du CNES, fournit une contribution majeure aux instruments pour cette recherche. Le PNST a contribué à animer une recherche coordonnée qui apporte une valeur ajoutée par des instruments au sol, les bases de données, la simulation numérique et la théorie. C'était le cas dans l'exploitation des projets phares de la discipline dans les dernières années, tels SOHO, CLUSTER et STEREO. Cette recherche fédérée doit se poursuivre dans l'exploitation des grands projets en cours et dans la préparation des missions futures, notamment SOLAR ORBITER et BEPI COLOMBO. Il est grandement souhaitable que l'action du PNST dans la coordination de ces recherches se poursuive.





Crozet	Expérience CRDS pour la spectropolarimétrie stellaire des composés hydrures métalliques	5	0	0					Mesures en laboratoire et observations solaires spectropolarimétriques de FeH	5	0	0				
Damé									Coronographie solaire Antarctique	7,5	0	0	ESCAPE Coronographie solaire Pic du Midi et Antarctique	12	0	0
Delcourt													Colloque de renouvellement du PNST	15		9,8
Delcourt													Forum sur la météorologie de l'espace	6		6
Demoulin					Etude des interfaces dans l'atmosphère solaire : de l'émergence de flux aux nuages magnétiques	20		15,5	Structuration et dynamique de l'atmosphère solaire	20		15	Structuration et dynamique de l'atmosphère solaire	20		10,8
Dintrans					Meeting annuel du code MHD international libre "Pencil code"	2,5	2,5									
Dubernet									Participation à colloque final de VAMDC	4	0	0				
Dudok de Wit	Météorologie de l'espace : irradiance solaire et études thermosphériques	10,2		7												
Fabrice					Radiohéliographe de Nançay	15	11,5		Radiohéliographe de Nançay	14,6	13,6		Radiohéliographe et surveillance solaire à Nançay	16	8,8	

Faurobert	Vers la très haute résolution en physique solaire : de la photosphère à la couronne	16	8		Etude de l'atmosphère solaire à haute résolution spatiale : de la photosphère à la couronne	23		11,4	Méthodes à haute résolution angulaire et haute dynamique pour l'étude de l'atmosphère solaire	10	6,9		Explorations 3D de l'atmosphère solaire	10		5,1
Fontaine	Organisation ateliers (EST - solaire sol - missions futures)	11	11						Colloque Météo de l'Espace	4,5	4,5					
Fontaine					Colloque PNST	24,6		24,6	Colloque PNST	10		9				
Galopeau	Diagnosics des processus magnétosphériques accessibles par les rayonnements planétaires	8,4	3		Diagnostic des processus magnétosphériques accessibles par les rayonnements planétaires	8,4	3		Diagnostic des processus magnétosphériques accessibles par les rayonnements planétaires	8,4	4		Exploration multi-échelle des magnétosphères planétaires par les émissions radio non-thermiques	8,4	0	0
Génot													CDPP	11		11
Grappin	Turbulence et dynamo, dynamique de la couronne et du vent solaire	9	6		Turbulence, dynamique de la couronne et du vent solaire	9	7		Turbulence, dynamique de la couronne et du vent solaire	9	7		Turbulence, dynamique de la couronne et du vent solaire	10	6,2	
Jacquey	CDPP	26,5		23	CDPP	21		21	CDPP	15		11				
Kerdraon	Radiohéliographe de Nançay	22	15													
Klein	Particules non thermiques dans l'atmosphère solaire et l'espace interplanétaire	10		8	Particules non thermiques dans l'atmosphère solaire et l'espace	5	5		Particules non thermiques dans l'atmosphère solaire et l'espace	19	12		Accélération de particules, processus cinétiques et radiatifs dans l'atmosphère solaire	12,8	7,2	
Koechlin									Acquisition et valorisation scientifique d'images de la photosphère et des protubérances solaires	10,75	5					

Krafft													Interactions de paquets d'ondes de Langmuir avec des faisceaux de particules énergétiques dans des plasmas fortement inhomogènes du vent solaire	10,5	3,7	
Lamy	Mesure du diamètre solaire par imagerie rapide CCD et chronodatage	30	0	0					Etude du diamètre solaire par chronodatation et observations	29	0	0				
Leblanc									Vers une modèle intégré thermosphère-ionosphère-mésosphère	9,75		8,6				
Lilensten					Observer la polarisation sur tout le spectre auroral	26,8	2,2									
Lopez Ariste	HD_TUNIS	6	6						Mesure des conditions magnétiques et physiques du plasma des protubérances solaires	8,6	6		Mesure des conditions magnétiques et physiques du plasma des protubérances solaires	8	2,6	
Malherbe									Observations solaires systématiques	2	0	0	Observations THEMIS: Abondances solaires et stellaires / tentative de mesure de B sur Cor Caroli	1,3	1	

Malherbe												IAUS300 Colloquium "Nature of prominences and their role in Space Weather"	8		3	
Marchaudon	SuperDARN France	16	10		SuperDARN France	12	9		SuperDARN France	7	6,7		SuperDARN France	7	6	
Marchaudon	TIMME	18	11		TIMME	12	9		TIMME	5	5					
Mazelle	Etude de la macro/micro turbulence dans le choc terrestre	22		8	Etude des processus de turbulence gouvernant une onde de choc sans collision	16		12	Etude des processus de turbulence gouvernant une onde de choc sans collision	16		12	Etude des processus de turbulence gouvernant une onde de choc sans collision	12		7,3
Modolo	Interaction plasma- neutres dans les environnements planétaires	11,23	4		Interaction plasma- neutre dans les environnements planétaires	10	6	1					Couplages ions- neutres dans l'environnement de Ganymède : préparation à la mission JUICE	6,5		2,4
Mottez	Radiations kilométriques terrestres ou impulsives et accélération des électrons par des ondes d'Alfvén	5,18	4		Ondes d'Alfvén, physique des aurores polaires et des plasmas spatiaux	8	6									
Paletou	BASS2000	19,6	16		BASS2000	16,4	14,6		BASS2000	14,7	9,6		BASS2000	9,6	9,6	
Pantellini	Modélisation numérique et observation du vent solaire	10	5		Modélisation numérique et observation du vent solaire	8		1								
Pariat													Emergence de flux magnétique dans l'atmosphère solaire: 5ème atelier international	3		2,2



Petit	Dynamo des jumeaux solaires : comparaison entre observations et simulations	2,5	2,5		Dynamo des jumeaux solaires : comparaison entre observations et simulations	2,5	2		Dynamo des jumeaux solaires : comparaison entre observations et simulations	2,5	0	0	IAUS 302 - Magnetic Fields Throughout Stellar Evolution	5	3,7	
Pitout	Radars à diffusion incohérente - EISCAT & EISCAT 3D	8,5	5						Radars à diffusion incohérente - EISCAT & EISCAT 3D	6	4,5		Radars à diffusion incohérente : EISCAT et EISCAT 3D	6,5	4,4	
Pitout													Thermosphère-Ionosphère-Magnétosphère Multi-Echelles (TIMME)	8	5,1	
Politano	Instabilités, structures et turbulence dans les fluides conducteurs et plasmas magnétisés	15	12		Instabilités, structures et turbulence dans les fluides conducteurs et les plasmas magnétisés	10,4	10									
Pottelette	Atelier international sur la physique des régions aurorales : Avancées et Perspectives	6		6									Atelier International sur la Physique des Régions Aurorales: Avancées et Perspectives	6		3,7
Retino									Reconnexion magnétique dans le système solaire	15		6				
Rincon													Nature de l'opération : Organisation d'une école de physique des Houches	6,2		3,7

Roudier	Imagerie solaire à grand champ et étude de la variation en latitude de la température de la photosphère avec la lunette Jean Rösch et CLIMSO	18,93	14,7		CLIMSO	3,06	2,8										
Schmieder	Etude des interfaces dans l'atmosphère solaire : de l'émergence de flux aux nuages magnétiques	30		20													
Sulem									Instabilités, structures et turbulence dans les fluides conducteurs et les plasmas magnétisés	8	7			Turbulence et structures dans les plasmas héliosphériques	7	4,4	
Turck-Chièze	Manifestations d'activité solaire en sismologie et modélisation associée	13	6		Manifestations d'activité solaire avec les instruments de sismologie et modélisations associées	10	1,5		Manifestations d'activité solaire avec les instruments de sismologie et modélisations associées	7,5	0	0					
Zarka														Structure et dynamique des magnétosphères de Jupiter et Saturne, émissions électromagnétiques et étude des environnements planétaires et recherche d'exoplanètes avec LOFAR	15,6	3,7	



**ANNEXE B : AUTRES PROJETS (ANR, FP7)***☞ Projets ANR*

## 1. HELIOSARES

PI : F. Leblanc (LATMOS, Guyancourt)

Labos PNST : LATMOS, IRAP

Septembre 2009 - Septembre 2013

## 2. Jeune Chercheur THESOW (Turbulence HEating in the SOLar Wind)

PI : F. Sahraoui (LPP, Palaiseau)

Labos PNST : LPP, Lagrange

Janvier 2012 - Janvier 2016

## 3. TOUPIES

PI : J. Bouvier (CEA)

Labos PNST : CEA

Janvier 2012 - Janvier 2016

## 4. IDEE (Interactions Des Etoiles et des Exoplanètes)

PI : F. Baudin (IAS, Orsay)

Labos PNST : IAS, LESIA

Janvier 2013 - Janvier 2017

## 5. MARMITE (MAGnetic inteRactions at Mercury between the InTerior and the Exosphere)

PI : B. Langlais (LPG, Nantes)

Labos PNST : LATMOS, LPP

Avril 2014 - Avril 2018

*☞ Projets LABEX-IDEX*

## 1. DAMSE (IDEX Sorbonne-Paris-Cité)

Co-PI : S. Brun (CEA)

Janvier 2013 - Janvier 2016

## 2. VKstar (IDEX Paris-Saclay)

Co-PI : S. Brun (CEA)

Janvier 2014 - Janvier 2015

## 3. Turbulence cinétique dans la magnétogaine terrestre (Labex Plas@Par)

PI : F. Sahraoui (LPP)

Janvier 2014 - Juin 2016

*☞ Projets FP7*

## 1. HESPE (High Energy Solar Physics Data in Europe)

PI: M. Piana (Univ. Genova, Italie)

Labos PNST: LESIA

Décembre 2010 - Novembre 2013

2. SEPServer (Data Services and Analysis Tools for Solar Energetic Particle Events and Related Electromagnetic Emissions)

PI: R. Vainio (Univ. Helsinki, Finlande)

Labos Français: LESIA, CSNSM Orsay

Décembre 2010 - Novembre 2013

3. SPACECAST

Labos PNST : ONERA

Mars 2011 - Février 2014

4. MAARBLE

Labos PNST : ONERA

Janvier 2012 - Décembre 2014

5. SHOCK (Solar and HeliOspheric Collisionless Kinetics):

PI : D. Burgess (Queen Mary College, London, UK)

Labos PNST : LESIA

Janvier 2012 - Décembre 2015

6. SPACESTORM

Labos PNST : ONERA

Avril 2014 - Mars 2017

☞ Autres

1. SOTERIA (Solar Terrestrial Interactions and Archives)

PI : G. Lapenta (Ku-Leuven, Belgique)

Labos PNST : LPC2E, LESIA

2009-2011

2. ATMOP (Advanced Thermosphere Modelling for Orbit Prediction)

PI : Noelia Sánchez Ortiz (DEIMOS-Space, Espagne)

Labos PNST: LPC2E

2011-2013

3. SOLID (First European Solar Irradiance Database)

PI : W. Schmutz (PMOD, Suisse)

Labos PNST : LPC2E

2012-2015

4. (COST) TOSCA (Towards a more complete assessment of the impact of solar variability on the Earth's climate)

PI : T. Dudok de Wit

Labos PNST : LPC2E

2012-2015