

Bilan scientifique - II- ACTIVITES SCIENTIFIQUES

II.3. Pôle de Physique Solaire

1. Présentation générale	1
2. Rapport d'activité du PPS de Janvier 2006 à Mai 2008	1
2.1. Moyens d'investigation	1
2.1.1. Instruments spatiaux	1
2.1.2. Instruments au sol	1
2.1.3. Théorie et Modélisation	2
2.2. Résultats scientifiques	2
2.2.1. Amplification, émergence et dynamique du champ magnétique photosphérique	2
<i>Fait Saillant N° 1</i>	3
2.2.2. Structuration tridimensionnelle des champs magnétiques cisailés dans la couronne	4
<i>Fait Saillant N° 2</i>	5
2.2.3. Déclenchement et développement de phénomènes éruptifs	5
<i>Fait Saillant N° 3</i>	6
2.2.4. Accélération et transport de particules, vers et hors du Soleil ...	7
<i>Fait Saillant N° 4</i>	8
2.2.5. Relations Soleil-Terre, irradiance solaires et nuages magnétiques héliosphériques	9
<i>Fait Saillant N° 5</i>	9
2.3. Conduite de projets instrumentaux	10
2.3.1. EST (European Solar Telescope):	10
2.3.2. SMESE / DESIR (Small Explorer for Solar Eruptions)	11
2.3.3. FASR (Frequency Agile Solar Radio telescope)	11
2.3.4. Conduite de campagnes d'observations coordonnées sol/espace .	12
2.4. Activités de service	12
2.4.1. Observations Systématiques et Surveillance Solaire :	12
2.4.2. Centres de données BASS2000 et SECCHIRH	13
2.4.3. Moniteurs à Neutrons	14
2.5. Activités d'enseignement et de vulgarisation	14
2.5.1. Enseignement	14
2.5.2. Vulgarisation	14
2.6. Autres activités nationales et internationales	15
3. Prospective du PPS pour 2010-2013	15
3.1. Un programme scientifique fédérateur et pertinent	15
3.2. Des projets pour porter le programme scientifique	16
3.3. Une phase charnière pour la physique solaire à Meudon	17

II.3. Pôle de Physique Solaire

1. Présentation générale :

Le Pôle de Physique solaire (PPS) comporte en fin de plan quadriennal 16 chercheurs dont 1 émérite, 18 ingénieurs et techniciens (16 du LESIA et 2 CDD) qui travaillent principalement dans les domaines du pôle, 2 thésitifs, 2 post-docs, et plusieurs chercheurs associés. Le PPS a bénéficié de la mise à disposition par le LESIA d'une équipe de 15 ingénieurs et techniciens qui ont travaillé pour la phase A du projet DESIR, et de la collaboration d'1 ingénieur du Pôle Instrumental du GEPI pour les projets DESIR et EST. Durant le plan quadriennal, le PPS a accueilli 1 autre post-doc, 2 autres thésitifs (dont 1 est actuellement post-doc aux Etats Unis), ainsi que de nombreux stagiaires et visiteurs étrangers.

Les recherches du PPS portent sur l'étude de l'activité magnétique de l'atmosphère du Soleil, essentiellement dans sa couronne, mais aussi depuis ses origines au niveau de la photosphère jusque dans ses manifestations interplanétaires. Les champs magnétiques engendrés à l'intérieur du Soleil émergent dans son atmosphère selon un cycle de 11 ans. Leur interaction avec le plasma collisionnel engendre une vaste gamme de phénomènes actifs dans la chromosphère et la couronne solaire. Ces phénomènes s'échelonnent sur plusieurs ordres de grandeur en taille, énergie, fréquence et durée. Ils vont du chauffage peu énergétique et plus ou moins stationnaire du plasma coronal, jusqu'à l'accélération de particules de hautes énergies lors d'éruptions soudaines qui sont souvent associées à des éjections très énergétiques de structures magnétisées vers l'espace interplanétaire, en passant par des phénomènes ayant des échelles de temps intermédiaires comme la formation de concentrations de champs magnétiques de tailles diverses dans la photosphère et la dynamique de la chromosphère, des protubérances et des boucles coronales. Les recherches du PPS visent à comprendre tous ces phénomènes, qui sont à l'origine des perturbations les plus fortes des environnements planétaires, et dont on retrouve la physique dans plusieurs objets astrophysiques et dans les machines à fusion par confinement magnétique.

2. Rapport d'activité du PPS de Janvier 2006 à Mai 2008 :

2.1. Moyens d'investigation :

2.1.1. Instruments spatiaux :

Le PPS a un statut de Co-Investigateur sur l'instrument LASCO de SOHO, sur RHESSI, sur l'ensemble SECCHI de STEREO, sur ULYSSES, sur ACE et sur PICARD. Le PPS exploite les données de tous ces instruments, ainsi que ceux du télescope EUV de TRACE (NASA), des télescopes XRT en X-mous et SOT pour l'imagerie et la spectro-polarimétrie sur HINODE (JAXA/NASA/STFC), et de presque tous les autres instruments de SOHO (ESA/NASA), notamment son imageur EIT en EUV, ses spectromètres SUMER et CDS et son magnéto-graphe MDI. Les techniques développées au PPS pour l'exploitation de ces données sont le traitement d'image et la spectroscopie dans l'EUV, ainsi que le couplage de données remote-sensing et in-situ, notamment avec des méthodes de co-alignement de données disparates.

2.1.2. Instruments au sol :

Les chercheurs du laboratoire duquel est issu le PPS sont à l'origine du télescope THEMIS et de ses instruments MTR et DPSM (pour la spectro-imagerie et -polarimétrie dans le visible), ainsi que du Radio Héliographe de Nançay et le GMRT indien (pour l'imagerie multi fréquence en ondes radio métriques), qui sont tous régulièrement exploités par le PPS. Le pôle exploite aussi la Lunette

Jean Rösch du Pic du Midi et la Tour Solaire de Meudon, sur lesquels il a des activités de R&D, ainsi que le réseau de Moniteurs à Neutrons de l'IPEV, et le Sub-millimeter Solar Telescope brésilien (SST). Les techniques utilisées sont, en plus de celles mentionnées ci-dessus pour les instruments spatiaux, la spectro-imagerie et la spectro-polarimétrie dans le visible, l'interférométrie et la synthèse d'ouverture en ondes radio, et la reconstruction de trajectoires de particules.

2.1.3. Théorie et Modélisation :

Le PPS développe et exploite des théories analytiques et des outils numériques pour la structuration et la dynamique des champs magnétiques de l'atmosphère solaire, ainsi que pour l'accélération de particules par des champs électriques. Son savoir-faire pour les extrapolations sans-force linéaire des champs magnétiques de la couronne et le calcul de leur topologies s'est, au cours du quadriennal, étendu à la simulation numérique lourde en magnétohydrodynamique, et ses activités en modélisation stochastique de la libération d'énergie magnétique par des automates cellulaires, et pour le calcul de l'accélération et du transport de particules dans les milieux magnétisés se sont développées.

2.2. Résultats scientifiques :

La physique de l'activité magnétique du Soleil repose sur deux principes fondamentaux : premièrement, l'accumulation lente d'énergie magnétique dans la couronne sous forme de cisaillement et de torsion magnétique, dus à la dynamique et l'émergence des champs magnétiques dans la photosphère ; deuxièmement, la conversion brutale de cette énergie en mouvement, chauffage et accélération de particules. Les résultats scientifiques du PPS sont présentés ci-dessous dans cette perspective, avec l'accent mis sur 5 faits saillants.

En termes bibliométriques, **sur 29 mois** (presque 2 ans $\frac{1}{2}$) correspondant à la période couverte par ce rapport, **pour 19 chercheurs** en poste, associés et thésitifs présents au LESIA pendant tout cette période, le PPS a produit **61 publications référées dans des revues de rang A**. Cela correspond à une moyenne de **1.33 publication /chercheur /an**, avec plusieurs chercheurs ayant réalisé 4 publications /an ou plus. En Juin 2008 le service ADS de la NASA donne **199 citations** pour ces 61 publications. 7 d'entre-elles sont déjà citées 8 fois ou plus, ce qui donne un **facteur h égal à 7** pour le PPS entre le 1^{er} Janvier 2006 et le 31 Mai 2008.

2.2.1. Amplification, émergence et dynamique du champ magnétique photosphérique :

Du fait de sa très grande densité et de sa relativement faible température, la photosphère stratifiée se comporte comme une interface entre l'intérieur et l'atmosphère solaire, interface qui impose ses contraintes à la couronne au-dessus par des couplages magnétiques. Comprendre le magnétisme à la photosphère, c'est donc comprendre les origines de l'activité magnétique solaire, ce qui explique une activité soutenue du PPS dans cette thématique.

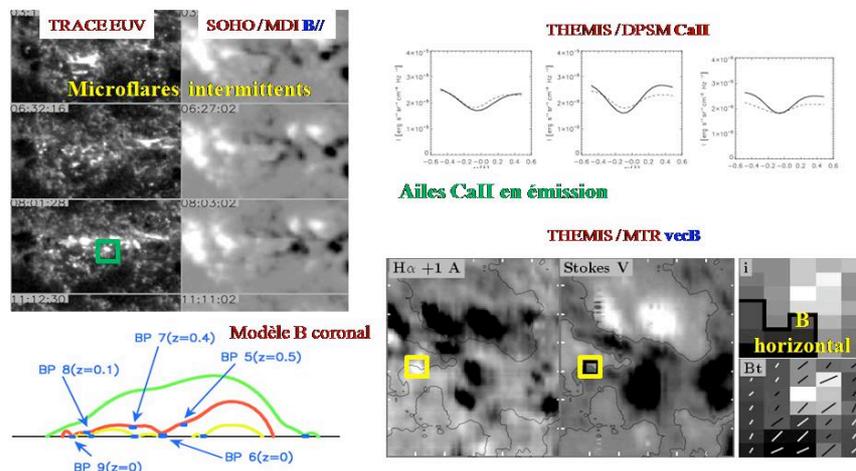
La concentration du champ magnétique à l'interface des granules par processus de dynamo locale convective a été caractérisée à différentes altitudes, et de façons différentes. Le PPS a conduit et participé à des observations au Pic du Midi, notamment après avoir développé un nouveau polarimètre à cristaux liquides. Ces observations à haute résolution spatiale avec l'instrument DPSM ont directement montré leur association avec les mouvements convectifs descendants (Roudier et al. 2006), une propriété prédite par les modèles de magnéto-convection. C'est avec THEMIS qu'a été caractérisée la détectabilité des plus petites concentrations de flux magnétique, à la fois par comparaison avec d'autres instruments réputés qui se sont montrés moins performants (Schmieder et al. 2006), par la quantification des effets du seeing sur la génération d'artefacts dans la mesure des champs magnétiques non résolus, en comparant des observations spectroscopiques à des modèles magnétostatiques couplés à des calculs d'altitude d'émissivité le long du profil des

raies photosphériques (Mein et al. 2007), ainsi que par l'étude de la structure hyperfine des raies du Mn I (Lopez Ariste et al. 2007). Certains de ces travaux ont reposé sur la calibration croisée entre les mesures de MDI sur SOHO avec celles du DPSM (Berlicki et al. 2006) et du MTR (Dudik et al. 2008) de THEMIS. De par ses expertises en réglages instrumentaux et à la conduite d'observations difficiles avec THEMIS, le PPS a aussi contribué à la première mesure directe au monde d'un champ magnétique faible, désordonné et très incliné, localisé en dehors des fortes concentrations de flux mentionnées précédemment, et ce un an avant les mesures de HINODE (Bommier et al. 2007). C'est cette même expertise instrumentale qui a permis au PPS de contribuer aux mesures de polarisation au limbe avec THEMIS (Bommier et al. 2006) et de conduire un programme d'étude complémentaire au Pic du Midi (Derouich et al. 2006, Malherbe et al. 2007).

Plusieurs aspects des conséquences de la dynamique photosphérique sur les couches superficielles de l'atmosphère solaire ont aussi été étudiés, projets pour lesquels l'essentiel des études a été l'observation des champs de vitesses et des champs magnétiques vectoriels dans la photosphère, couplés à des observations multi longueur d'onde. La mesure de flashs périodiques dans l'ombre des taches solaires a conduit à revisiter le modèle simpliste de champ uniforme au milieu de ces structures (Tziotziou et al. 2007). Des évidences de réponse directe de la couronne à l'émergence de petites polarités magnétiques de signe opposées à celui de leur voisinage ont été montrées pour l'interruption momentanée de protubérances (Schmieder et al. 2006). Le PPS a aussi participé à une campagne d'observations internationale ainsi qu'à l'interprétation de ses données, campagne qui a montré l'absence de mouvements photosphériques convergents sous les protubérances, alors que c'est sur cette propriété que reposent la moitié des modèles de formation/éruption de ces structures (Rondi et al. 2007), et qui a aussi montré une corrélation ponctuelle entre l'envol d'une protubérance dans la couronne et le développement d'un mouvement de cisaillement sous-jacent (Roudier et al. 2008).

Fait saillant n°1 :

La mise en évidence observationnelle de l'émergence résistive de flux magnétique



Le PPS a mis en évidence une propriété jusqu'alors inconnue dans le processus de formation des régions actives par émergence de flux : la libération résistive du plasma dense piégé dans des ondulations des champs magnétiques horizontaux produits par l'instabilité de Parker, formant des micro-éruptions lors de leur passage au travers de l'interface photosphérique. Il s'est avéré que ces micro-éruptions sont les bombes d'Ellerman, un phénomène jusqu'alors bien observé mais pas compris. Ce processus fondamental a été découvert avec le magnéto-graphe vectoriel FGE (Flare Genesis Experiment) puis a été vérifié avec THEMIS, dont le MTR a permis la mesure du champ magnétique émergent, et dont le DPSM a permis de mettre en évidence pour la première fois au monde des profils de raie typiques des bombes d'Ellerman dans la basse chromosphère (Pariat et al. 2007). Ces résultats sont aujourd'hui considérés par les groupes

étrangers qui développent des modèles d'émergence de flux. De façon plus générale, la compréhension des mécanismes conduisant à l'émergence de flux magnétique dans la couronne au travers de la photosphère, qui est l'origine de toute l'activité magnétique de l'atmosphère solaire, est l'un des enjeux majeurs du projet European Solar Telescope (EST).

2.2.2. Structuration tridimensionnelle des champs magnétiques cisailés dans la couronne :

Les protubérances (aussi appelées filaments lorsqu'observées en projection sur le disque solaire) sont les plus grandes structures dans l'atmosphère solaire pour lesquelles la torsion du champ magnétique est importante. Elles offrent donc une opportunité unique d'étudier la formation et la structuration du champ magnétique et du plasma dans les structures pré-éruptives en général.

Le PPS a poursuivi ses travaux du précédent quadriennal sur la structuration 3D de ces objets, tant par l'étude spectroscopique multi longueur d'onde que par la modélisation magnétostatique directe d'observations et la simulation dynamique de leur formation par coalescence de structure cisailées plus petites ou par émergence de polarités du Soleil calme. Les études spectroscopiques ont montré que les protubérances étaient systématiquement entourées d'une zone étendue absorbant les rayonnements EUV, dont l'altitude encore incertaine dépend du profil radial de densité et d'épaisseur optique dans la couronne autour du filament (Schwartz et al. 2006) ; les résultats ne sont pas encore tranchés et il est probable que de futures observations en Ly α , par exemple avec LYOT sur SMESE, apportent des éléments discriminatoires. Ce type de mesures spectroscopiques, couplées avec des modèles de transfert de rayonnement dans les raies de Lyman de H (Gunar et al. 2007), a aussi permis de proposer un nouvel indicateur de la direction du champ magnétique dans les protubérances (Schmieder et al. 2007). La modélisation magnétostatique a montré qu'une protubérance apparemment continue pouvait en fait être formé de deux tubes magnétiques torsadés alignés et distincts, ce qui implique que la torsion totale le long d'une protubérance peut souvent être plus petite que celle qui correspond au seuil d'instabilités MHD, comme le mode de kink (Dudik et al. 2008). Ce type de modélisation, combiné aux observations de THEMIS, a aussi permis d'expliquer les interruptions temporaires des protubérances par l'émergence de petites polarités magnétiques engendrant des changements de topologie dans la couronne, d'un tube torsadé à une simple arcade (Schmieder et al. 2006). Les simulations dynamiques ont expliqué les conditions observationnelles de coalescence de protubérances mises en évidence lors du précédent quadriennal, et elles ont montré que cette coalescence ne pouvait se faire que par une reconnexion magnétique glissante entre des arcades de même signe d'hélicité magnétique (Aulanier et al. 2006).

Les autres grandes structures qui caractérisent un fort cisaillement magnétique dans la couronne sont les boucles cisailées observées en rayons X. En utilisant plusieurs instruments et plusieurs outils de traitements, le PPS a premièrement montré que ces boucles, prise individuellement, ont d'une manière générale une section constante, qui pourrait être un signe de torsion magnétique à petite échelle (Lopez Fuentes et al 2006, 2008). Deuxièmement, la topologie du champ magnétique et la distribution spatiale des courants électriques dans ces boucles, lorsqu'elles forment en groupe une structure sigmoïdale, a été étudiée. Au cours du précédent quadriennal, le PPS avait proposé un modèle numérique prédisant une structure morcelée des sigmoïdes, à base altitude sous des grands tubes torsadés de la couronne présentant des courants électriques spiraux dans la photosphère. Ces prédictions ont été confirmées avec une collaboration internationale, qui a produit une extrapolation non-linéaire d'un sigmoïde observé avec les meilleures observations en rayons X et en magnéto-graphie vectorielle de HINODE (Schrijver et al. 2008).

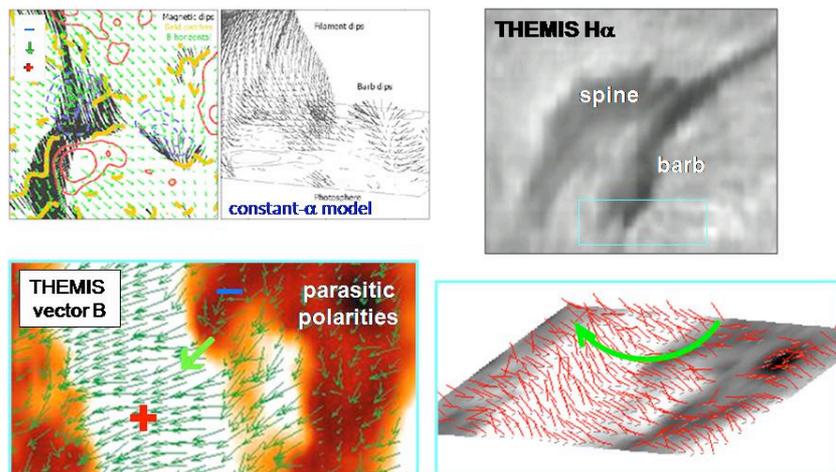
Le dénominateur commun aux structures non potentielles de la couronne solaire est la présence d'hélicité magnétique. Du fait de sa propriété d'invariant MHD, le PPS a commencé à développer des outils de mesure pour cette quantité dans les observations, ce qui n'avait jamais été fait jusqu'alors du fait des difficultés à la sortir du cadre des études purement théoriques. Une nouvelle définition correcte du flux de la densité surfacique d'hélicité introduite au cours du précédent

quadriennal (Pariat et al 2005) a pu être appliquée à un set d'observations qui avait déjà été traitée avec une définition ancienne et fausse. Il a été montré que l'injection d'hélicité dans la couronne par la photosphère est plus homogène que ce que l'on croyait avant, ce qui permet de mieux cadrer les modèles numériques et l'interprétation multi-longueur d'onde (Pariat et al. 2006). Des études complémentaires ont permis de proposer une méthode encore plus performante pour mesurer cette hélicité, attendu que l'on connaisse la connectivité d'un nombre suffisant de tubes de flux magnétiques (Démoulin et al. 2006).

Fait saillant n°2 :

La mesure inédite du support magnétique des parties basses des protubérances

En collaborant avec THEMIS pour la mesure des champs magnétiques vectoriels dans les couloirs de filament, le PPS a directement mis en évidence, pour la première fois au monde, la présence de lignes de champ magnétiques concaves au niveau de la photosphère sous les pieds et le corps des protubérances (Lopez Ariste et al. 2006). Il a pu donc être établi que le plasma dense dans les parties basses des protubérances devait être, comme à plus haute altitude, maintenu à l'équilibre vertical par la force de tension magnétique s'opposant à la gravité solaire, ce qui jusqu'ici n'était qu'une hypothèse théorique parmi d'autres. La conduite de ce projet a résulté de la mise en commun du savoir-faire de THEMIS pour réduire des données spectro-polarimétriques complexes et de l'expertise du PPS dans la physique des protubérances solaires. Ces observations inédites avec le MTR de THEMIS ont apporté un sérieux argument en faveur du modèle magnétostatique proposé par le PPS il y a 11 ans pour les protubérances, modèle qui bien que repris par deux groupes étrangers depuis, reste toujours très débattu dans la communauté internationale des observateurs.



2.2.3. Déclenchement et développement de phénomènes éruptifs :

Les phénomènes éruptifs de la couronne solaire peuvent être séparés en deux grandes classes. Ceux qui s'accompagnent d'une restructuration magnétique confinée, et ceux qui engendrent l'éjection de nuages magnétisés vers l'héliosphère, appelés des éjections de masse coronales (CME).

Les rubans d'éruption, dus à l'impact chromosphérique de particules accélérées dans la couronne, étant les structures les plus émissives du Soleil, du sub-millimétrique aux rayons gamma, le PPS a poursuivi ses études de leurs propriétés. Il a été montré avec RHESSI que ces derniers peuvent s'accompagner d'émissions non-thermiques plus ou moins forte, reliées avec des analyses spectroscopiques quantitatives par des mouvements de plasma ascendants, s'accéléralant depuis la basse chromosphère jusqu'à la couronne (Del Zanna et al. 2006).

C'est l'analyse de l'évolution temporelle de ces rubans, combinée à des extrapolations théoriques des champs magnétiques dans la couronne, qui a permis de montrer que le modèle de déclenchement de CME par une reconnexion magnétique dans la couronne au niveau d'un point nul

du champ magnétique était trop simpliste : il a été montré avec THEMIS et des extrapolations que la présence de points nuls ne suffit pas à y générer de la reconnexion (Li et al. 2006) alors qu'elle peut avoir bien lieu en leur absence, au niveau de quasi-séparatrices (Mandrini et al. 2006), et qu'elle peut résulter d'un effet de type domino lorsqu'une CME au voisinage du point nul permet d'en déclencher une seconde (Li et al. 2007). Ce même type d'effet domino a conduit à des études multi longueur d'ondes d'événements complexes grâce auxquels les chercheurs du PPS ont pu développer de nouvelles méthodes d'analyse des observations permettant d'éviter les interprétations hâtives sur l'association entre des rubans et le site d'origine d'une CME (Goff et al. 2007). Le PPS a aussi testé un autre modèle, concurrent, de démarrage de CME avec THEMIS : il ainsi montré que le flux magnétique tend à décroître autour des protubérances avant leur éruption (Schmieder et al. 2008). Tous ces résultats montrent que le déclenchement des éruptions ne peut se résumer à un processus théorique établi. Finalement, le PPS a mis en évidence de nouveaux types d'émissions radio de type IV à basse altitude dans la couronne après le démarrage d'une CME, qui ont été interprétées par une signature de la reconnexion magnétique dans la traînée des CME (Vourlidis et al. 2007).

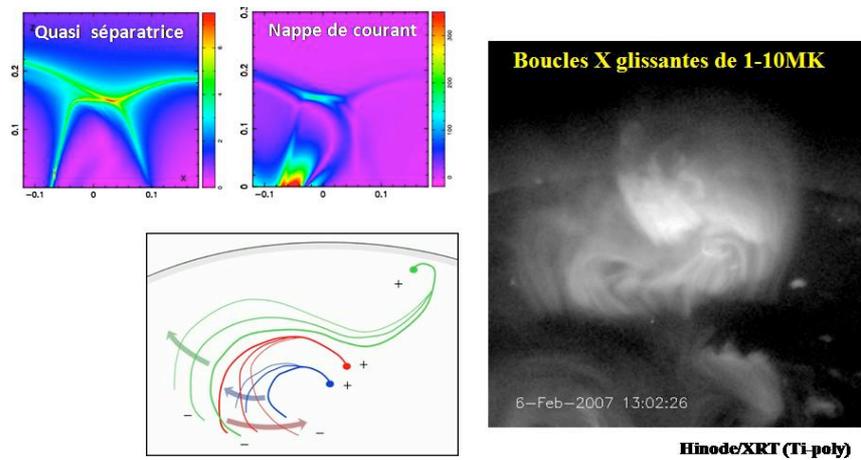
Un autre volet des recherches du PPS sur les éruptions solaires est la caractérisation des phénomènes liés au développement des CME dans la basse couronne, à l'échelle du rayon solaire. Après avoir été mis en évidence lors du précédent quadriennal avec les observations de faisceaux de particules en radio, il a été relié à la formation de trous coronaux transitoires en EUV, résultant de l'ouverture vers l'héliosphère de boucles trans-équatoriales poussées par les CME (Delannée et al. 2007). Il a aussi été montré que le flux magnétique de ces trous coronaux transitoires correspondait au flux magnétique azimutal, et non axial, des CME dans le milieu interplanétaire, confirmant le processus de reconnexion magnétique dans la nappe de courant de la traînée des CME mentionnée ci-dessus (Mandrini et al. 2007). Plusieurs interprétations physiques ont été proposées pour les perturbations coronales à grande échelle lors des CME. L'idée la plus répandue dans la communauté à ce jour est la formation d'un choc coronal, que l'on croit être vu en ondes radio avec les types II, cette perturbation étant associée à des fronts de propagation vus sur le disque en rayons X, EUV et en H α (Delannée et al. 2007), ou bien étant situé en amont de boucles X éruptives vues au limbe (Dauphin et al. 2006). D'autres interprétations ont été proposées afin de satisfaire des contraintes observationnelles incompatibles avec les chocs, comme la rotation progressive des perturbations, leur caractère directionnel et souvent stationnaire. Il a été proposé que les parties stationnaires de ces fronts sont liées à la formation de courants électriques dans des topologies complexes du champ magnétique solaire à grande échelle (Delannée et al. 2007), et que leurs parties propagatives peuvent s'interpréter avec des modèles conceptuels comme une avalanche de reconnections magnétique dans le Soleil calme (Attrill et al. 2007), ou bien avec des modèles MHD comme l'interface de courant électrique entre le tube de flux éruptif de la CME et les champs magnétiques à grande échelle du Soleil (Delannée et al. 2008).

Fait saillant n°3 :

La découverte théorique et observationnelle du mode de reconnexion glissante

La notion de quasi-séparatrices, au niveau desquelles le champ magnétique coronal a de très forts gradients de connectivité photosphérique, est un concept théorique qui avait été introduit par les chercheurs du PPS il y a 13 ans. Leur identification dans des extrapolations des champs coronaux avait ensuite été utilisée pour interpréter les observations de plusieurs éruptions. Leur physique a récemment été reconsidérée avec les nouveaux outils de simulation MHD 3D développés au cours du quadriennal : il a été montré numériquement que des nappes étroites de courants électriques se formaient naturellement dans ces quasi-séparatrices, qu'elles engendraient naturellement de la reconnexion magnétique, mais sur un mode intrinsèquement tridimensionnel et sans point nul, conduisant à des glissements continus et parfois super-Alfvéniques des tubes de flux coronaux les uns pas rapports aux autres (Aulanier, Pariat et al. 2006). Ce modèle permet d'interpréter la propagation rapide d'embrillancements le long des rubans d'éruption,

observées en rayons X durs lors du précédent quadriennal, et plus récemment en $H\alpha$ et en EUV (Del Zanna et al. 2006). Les premières observations avec HINODE du glissement croisé de boucles X ont directement confirmé l'existence de ce nouveau mode de reconnexion (Aulanier et al. 2007).



2.2.4. Accélération et transport de particules, vers et hors du Soleil :

Il est essentiel de comprendre les mécanismes d'accélération et de transport des particules énergétiques associées aux éruptions solaires. En effet, entre 20 et 60% de l'énergie magnétique libérée lors d'une éruption est convertie en accélération de particules, et sa rétroaction sur le champ magnétique est très sous estimé à ce jour.

Le PPS a effectué plusieurs types de modélisations d'accélération de particules. Des automates cellulaires, incorporant des champs électriques aléatoires et résolvant les équations cinétiques au sein d'une petite nappe de courant fragmentée, ont produit des spectres d'électrons, de protons et à des émissions gamma satisfaisants pour de fortes fragmentations de la nappe, mais aussi des spectres X plus plats que dans les observations (Dauphin et al. 2007). D'autres modélisations, basées sur l'organisation auto similaire critique, ont permis de mettre en évidence que la partie du spectre aux énergies les plus hautes était produite par des particules passant par un grand nombre de zones d'accélération dans la nappe fragmentée (Dauphin 2007). Ce type d'étude a aidé à interpréter le délai observé entre l'émission de rayons γ et de rayons X durs dans une éruption solaire, par l'injection et le piégeage des protons et des électrons dans des systèmes de boucles coronales différents (Dauphin et Vilmer, 2007).

Des mesures de la polarisation par impact sur les rubans d'éruption, avec THEMIS en $H\alpha$ et en Mg I, ont mis en évidence que les faisceaux d'électrons accélérés dans la couronne impactent préférentiellement sur les bords des rubans. Ces mesures ont aussi révélé l'existence potentielle de courants de retour autour de ces faisceaux (Xu et al. 2006). La confirmation de l'existence de ces courants, qui sont prédits par certains modèles cinétiques, serait une découverte essentielle : permettant une injection continue des électrons de la chromosphère dense vers la couronne diluée, ces courants résoudraient le problème de longue date de la source inconnue du très grand nombre d'électrons qu'il faut accélérer dans la couronne pour rendre compte des observations en X dur.

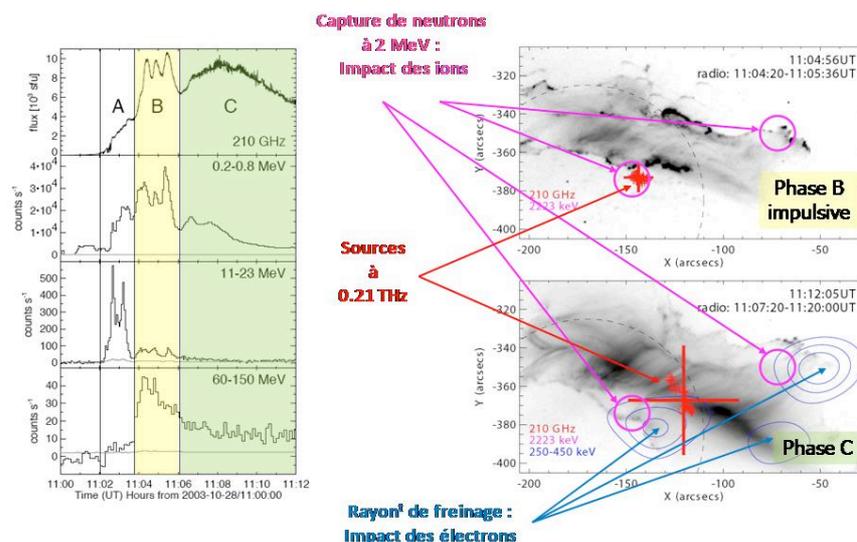
Plusieurs études ont porté sur la question de l'origine solaire, ou héliosphérique, des particules énergétiques du milieu interplanétaire qui impactent avec la Terre. Au cours du précédent quadriennal, la combinaison d'observations de types III en radio, avec les mesures in-situ à une unité astronomique (1 ua), a fortement suggéré que les électrons et les protons énergétiques à 1 ua sont accélérés dans la basse couronne. La nouvelle prise en compte de modèles de transport dans la spirale de Parker a permis d'expliquer le délai d'arrivée à 1 ua de différents faisceaux de particules, puis d'identifier leurs sources d'accélération dans la couronne dans des lignes de champ initialement ouvertes et dans d'autres résultant de l'ouverture par une CME (Kocharov et al. 2007).

De plus, le PPS a montré pour la première fois que le profil temporel du flux radio, au sein d'une CME encore proche du Soleil, était identique au profil temporel d'injection des électrons arrivant à 1 ua, apportant une confirmation inédite de l'origine coronale d'une large part des électrons interplanétaires (Maia et al. 2007). Une autre étude, basée sur l'évaluation de la vitesse d'Alfvén coronale à l'aide de modèles d'extrapolation du champ magnétique et de stratification du plasma, a montré que les CME super-Alfvéniques, donc produisant des chocs, accélèrent très peu de particules lorsqu'elles ne sont pas associées à une forte éruption (Marqué et al. 2006), contredisant aussi l'idée répandue de l'accélération des particules interplanétaires dans les chocs des CME.

La détection observationnelle des trous coronaux les plus étroits, auxquels certains types III sont associés, n'est pas toujours facile, du fait du faible contraste de ces structures en ondes radio métriques, et encore plus en EUV. Afin de faciliter leur détection, le PPS a développé au cours du quadriennal une nouvelle technique de combinaison des données radio du NRH et du GMRT indien, qui a été appliquée à l'imagerie instantanée des sursauts (Mercier et al. 2006). Cette technique devrait aussi pouvoir être utilisée avec la synthèse d'ouverture, pour l'étude de la structure fine des trous coronaux peu contrastés. En parallèle, l'utilisation d'extrapolations du champ magnétique coronal à grande échelle a déjà conduit à préciser la nature des sites d'accélération des types III dans la couronne. Il a été montré avec plusieurs codes que les faisceaux interplanétaires riches en ^3He provenaient de la reconnexion entre des lignes ouvertes et fermées haut dans la couronne (Wang et al. 2006, Pick et al. 2006, Yan et al. 2006), et qu'il existait des signatures faibles en EUV et dans le visible des jets de plasma produits par ces reconnexions. Des extrapolations sphériques ont aussi montré que les sites d'accélération dans la basse couronne des électrons, observés en radio dans la haute couronne et in-situ à 1ua, pouvaient souvent être décalés de plusieurs dizaines de degrés en longitude par rapport à ce qui est classiquement prédit par le calcul simple de la spirale de Parker dans le milieu interplanétaire (Klein et al. 2008). Il a aussi été montré que les électrons s'évacuant du Soleil observés comme des types III en radio pouvaient ne pas être magnétiquement connectés aux sites d'émissions X-durs de l'éruption associée (Trottet et al. 2006), impliquant l'existence de couplage d'échelles et distants dans la couronne lors des éruptions, en accord avec d'autres résultats antérieurs du PPS. Finalement, le PPS a mis en évidence pour la première fois avec des extrapolations l'existence de lignes de champ magnétiques localement concaves dans la couronne, pouvant interpréter des observations étonnantes en ondes radio des type III de classe N, pour lesquelles la dérive en fréquence n'est pas monotone (Démoulin et al. 2007).

Fait saillant n°4 :

Les premières images sub-millimétriques de réactions nucléaires lors d'une éruption X



Une combinaison d'observations radio à 0.21 THz du Multi Beam Radiometer de Berne, avec des images et des spectres en rayons X durs et γ de RHESSI et de CORONAS-F pour une éruption de classe X, a ouvert une nouvelle voie d'investigation pour la caractérisation des particules accélérées dans les éruptions. Une source radio compacte à 0.21 THz a été observée lors la phase impulsive de l'éruption. Elle a pour la première fois été identifiée comme étant co-spatiale au site des émissions γ provenant de la raie de capture neutronique à 2.2 MeV, elle-même étant la trace de l'impact d'ions énergétiques. Mais elles n'étaient pas co-spatiales avec les sources en X durs provenant du rayonnement de freinage des électrons relativistes. Cette observation indique donc qu'une fraction de l'émission radio pourrait être due à un rayonnement synchrotron de positrons, que l'on sait être créés par la désintégration de pions secondaires des réactions nucléaires induites par l'impact d'ions très énergétiques de plus de 200 MeV/nucléon (Trottet et al. 2008). La mesure précise de la part relative des électrons et des ions accélérés à de très hautes énergies dans la couronne pourra être établie avec l'observation de la forme du spectre dans le domaine du THz. C'est l'une des motivations principales du projet d'instrument DESIR sur SMESE.

2.2.5. Relations Soleil-Terre, irradiance solaires et nuages magnétiques héliosphériques :

Le PPS a participé à la mesure de l'irradiance solaire en EUV à partir des mesures de spectro-imagerie des instruments de SOHO, afin de caractériser la variabilité de ce flux de photons énergétiques pouvant interagir avec les hautes couches de l'atmosphère terrestre. Un spectre de référence pour le Soleil calme a été construit, qui pourra être utilisé à l'avenir pour le développement de modèles plus complets de l'irradiance solaire (Kretzschmar et al. 2006, Lilensten et al. 2007). Une autre activité pour la prévision de l'activité solaire est le traitement massif de l'information et l'émission d'alertes lorsque des événements éruptifs sont susceptibles de se déclencher. C'est dans ce contexte que le PPS a poursuivi le développement des techniques de reconnaissance automatique de structures solaires dans les bases de données (Abouadarham et al. 2008)

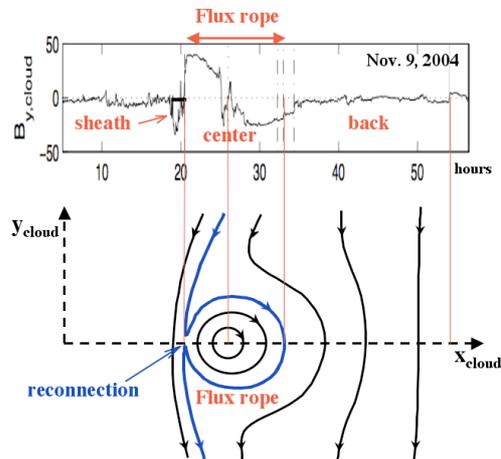
Des rares compilations de données sur des événements particuliers ont été réalisées en collaboration avec de nombreux instituts. Elles ont montré l'intérêt et les difficultés de suivre une perturbation depuis ses origines solaires jusqu'à la réponse de la magnétosphère terrestre (Hanuise et al. 2006). Le PPS a donc entrepris un nouveau projet d'étude des structures à faible β qui se propagent dans l'héliosphère, observés in situ par ULYSSES, ACE et STEREO. Elles sont issues des éjections de masse coronales (CME) en provenance du Soleil et qui sont à la source des sous-orages magnétiques les plus intenses dans la magnétosphère terrestre. Un tiers d'entre-elles, que l'on nomme nuages magnétiques, montrent une rotation cohérente du champ magnétique qui indique une topologie de type tube de flux magnétique torsadé. Les observations in situ, donnant une information locale de la structure le long de la trajectoire de la sonde, ont été complétées par une modélisation de la configuration magnétique, ce qui a permis de déduire des grandeurs physiques globales comme le flux et l'hélicité magnétique (Gulisano et al. 2007). Ces grandeurs ont été utilisées pour effectuer des bilans d'hélicité magnétique des régions sources sur le Soleil des CME associées ; pour les cas étudiés, l'hélicité magnétique perdue par la couronne solaire est en bon accord avec celle déduite des données interplanétaires. Ces résultats constituent les premières associations quantitatives globales entre les CME solaires et leurs contreparties interplanétaires.

Fait saillant n°5 :

La découverte de la forte érosion magnétique des CME dans le vent solaire

Lors de son transit depuis le Soleil à la sonde interplanétaire, un nuage magnétique plus rapide que le vent solaire environnant a interagi avec son champ magnétique. Le développement d'une méthode d'analyse inédite pour le champ magnétique (Dasso et al. 2006) a permis, pour la première fois, de mettre en évidence et de mesurer le flux magnétique reconnecté lors de cette interaction, en fonction de l'accumulation de flux en amont du nuage magnétique et de son étirement dans sa traînée. Il a ensuite été montré que ce flux reconnecté est très variable d'un événement à l'autre, et surtout qu'il peut constituer une fraction importante

du flux magnétique du tube de flux éjecté de la couronne lors d'une CME (Dasso et al. 2007). Cette découverte démontre qu'il faut absolument tenir compte du transport des CME dans le vent solaire pour quantifier, à terme, leur degré de géoeffectivité lors de leur interaction ultérieure avec la magnétosphère terrestre. En effet, ce degré dépend directement de l'amplitude et de la direction du champ magnétique interplanétaire au front du nuage magnétique incident. La question de la prise en compte de cette propagation reste un sujet très débattu dans la communauté, et il a été l'une des motivations de l'Imageur Héliosphérique de STEREO, qui commence à donner des observations exploitables.



2.3 Conduite de projets instrumentaux :

2.3.1. EST (European Solar Telescope):

Nos projets R&T pour le projet de télescope solaire européen de 4m EST consistent en l'étude, la conception, la réalisation, les tests sur le ciel, et la caractérisation d'un polarimètre à cristaux liquides (LCVR) et d'un spectro-imageur (DPSM) de nouvelle génération pour le projet européen de télescope solaire EST. Notre projet réunit deux types de compétences développées les années passées, au LESIA avec la réalisation de polarimètres rapides à cristaux liquides et des spectro-imageurs pour le Pic du Midi et pour la Tour Solaire de Meudon, et au GEPI avec la réalisation des spectrographes à fibres optiques GIRAFE puis FALCON pour le VLT. Nous avons déjà obtenu des crédits pour ces études du projet FP7 EST Design Study dont le PPS est partenaire, et de l'Observatoire de Paris.

L'expérience avec THEMIS nous a permis de nous confronter aux problèmes de l'instrumentation associée à l'observation du Soleil en spectro-polarimétrie multi-raies. Nous proposons d'utiliser des technologies récentes, avec fibres optiques et cristaux liquides, pour les résoudre et définir les spécifications d'un instrument de la classe des 4m. Parmi les études proposées, on peut citer : (i) la séparation des faisceaux lors de l'analyse polarimétrique, pour laquelle le PPS étudie une méthode de translation à fibres optiques pour corriger les défauts du séparateur lors de l'analyse polarimétrique ; (ii) l'identité des aberrations entre les deux voies d'analyse, qui peut être assurée par une rotation d'un des deux faisceaux et la dispersion différentielle entre les voies, corrigées par une réinjection précise des deux faisceaux sur la fente du spectrographe ; (iii) le couplage entre le spectrographe et les détecteurs, pour lequel la sélection des raies visible et infrarouge simultanément devient possible avec les fibres dédiées (par exemple les fibres fluorés pour l'IR) qui relient directement les spectrographes aux détecteurs ; (iv) la polarimétrie à cristaux liquides, du fait des limites présentement atteintes par les spectrographes et les détecteurs, et les polarimètres classiques à lames cristallines tournantes (du style de celui qui équipe THEMIS) : (v) la chaîne d'acquisition, qui n'est désormais plus limitée par les temps de

lecture des caméras CCD, mais par le temps de latence nécessaire au changement d'état de polarisation.

Nous allons donc réunir ces compétences (cristaux liquides et fibres optiques) pour la réalisation d'un prototype de polarimètre de nouvelle génération pour le visible entre 400 et 800 nm, avec des extensions prévues dans l'infra rouge jusqu'à 2000 nm, et d'un prototype de spectro-imageur par Double Passage Soustractif Multicanal (DPSM) de nouvelle génération utilisant un éclateur de faisceau à fibres optiques qui sera testé sur THEMIS.

2.3.2. SMESE / DESIR (Small Explorer for Solar Eruptions) :

Le démarrage de projet de microsatellite franco-chinois SMESE a eu lieu en Mars 2006, dans le contexte de la filière MYRIADE du CNES. Le projet comprend un coronographe et imageur disque en Ly α LYOT, un télescope infrarouge lointain DESIR et un spectromètre X/ γ HEBS. Le projet a été accepté pour des études de phase A en Juin 2006. La revue de fin de phase A a eu lieu début Mai 2008 : le groupe de revue y a conclu que les études menées démontrent qu'il n'y a pas de problèmes de faisabilité, et que du point de vue technique SMESE est prêt pour entrer en phase B. Pour des raisons budgétaires, le CPS du CNES a cependant recommandé l'arrêt de ce projet le 13 Juin 2008. Des actions sont en cours pour faire redémarrer le projet.

Le PPS a la responsabilité scientifique du télescope DESIR dont le but est d'obtenir les premières observations des éruptions solaires dans le continuum infrarouge lointain dans le domaine THz. La phase A a permis de démontrer la faisabilité de DESIR en termes de tenue des spécifications scientifiques. En particulier, le travail mené au LESIA a permis de : (i) caractériser un système de filtrage pour éliminer le flux thermique du Soleil et sélectionner et séparer deux bandes de longueurs d'ondes autour de 35 et 105 μm ; (ii) démontrer que la sensibilité requise est atteinte, pour les deux bandes de longueurs d'onde, en adaptant un peu des détecteurs (matrices de micro-bolomètres) du commerce, qui travaillent à température ambiante, bien qu'ils soient optimisés pour la bande 8-14 μm ; (iii) élaborer l'architecture opto-mécanique de DESIR optimisée pour les domaines de longueurs d'onde mesurés ; (iv) concevoir l'électronique embarquée pour piloter DESIR et faire des prétraitements en temps réel, compatibles avec les exigences scientifiques, les ressources du satellite et les capacités de télémétrie ; (v) étudier l'interface DESIR/plateforme au travers d'un système IDHP (Interactive Data Handling Processor) fourni par les équipes chinoises ; (vi) établir la liste de composants qui seront utilisés en s'assurant qu'ils ne sont pas soumis aux règles ITAR ; (vii) proposer un instrument (télescope et électronique) globalement compatible avec les autres instruments et les ressources (masse, volume, puissance consommée) de la plateforme.

Dans l'hypothèse d'un redémarrage du projet au CNES, il serait souhaitable que le développement de DESIR commence au plus tôt, afin de permettre un lancement de SMESE pour fin 2012 - début 2014. En effet, cette période correspond à la phase décroissante du cycle solaire, phase propice au déclenchement d'éruptions X intenses, que l'on croit être les plus favorables en termes de détectabilité d'émissions à des fréquences supérieures au THz.

2.3.3. FASR (Frequency Agile Solar Radio telescope) :

Depuis 2004, il a été construit un interféromètre expérimental à 2 antennes équipé d'un récepteur numérique adapté à la détection des émissions parasites typiques de la bande métrique. Le but est de tester un principe de récepteur capable d'observer dans des bandes de fréquence encombrées d'émissions parasites, en vue de l'appliquer au réseau basse fréquence du futur radiohéliographe américain FASR. Cet interféromètre utilise 2 des antennes du radiohéliographe de Nançay, et fonctionne donc entre 150 et 450 MHz. Le principe retenu est une analyse en fréquence par canaux très étroits (12 kHz), qui permet de localiser en fréquence et en temps les émissions parasites. Les fréquences utilisables sont intégrées en une bande de 1-2 MHz au moment de la corrélation. Les

fonctions de reconnaissance des émissions parasites et la corrélation sont réalisées en temps différé par une station de travail. Le récepteur a aussi une très grande dynamique, qui lui évite de saturer sur les parasites puissants.

Cet interféromètre a permis de tester la validité de ces principes : il est possible d'effectuer des observations dans des bandes de fréquence très encombrées, ce qui était impossible avec les récepteurs de la génération précédente qui intégrait toute la bande corrélée sans enlever les sous bandes étroites parasitées. Nous avons aussi pu commencer à faire une statistique du niveau des émissions parasites sur le site, et découvrir que les niveaux maximums sont atteints par des émissions très courtes (50ns) d'origine inconnue. Ces impulsions ne perturbent pas a priori les observations interférométriques, et ne sont donc pas dimensionnantes pour la dynamique du récepteur. La fin de cette étude est maintenant liée à la reprise de l'activité solaire, le but étant de mettre au point des algorithmes de détection de parasites qui ne perturbent pas l'observation des sursauts solaires.

Nous avons proposé d'étudier et de réaliser le prototype de récepteur numérique adapté à la partie basse fréquence (50-300 MHz). Ce prototype sera réalisé en utilisant les principes validés par l'étude déjà réalisée. Cette opération a été soumise à la CSA fin 2007, mais n'a pas été retenue en raison du planning surchargé de la station de Nançay (USN). Elle sera proposée de nouveau fin 2008, car des moyens humains devraient être libérés en 2009 à l'USN par la fin de l'étude européenne préparatoire à SKA.

2.3.4. Conduite de campagnes d'observations coordonnées sol/espace :

Le PPS a organisé chaque année plusieurs campagnes d'observations coordonnées. Il est important de faire mention de ce type d'activité, car sa préparation nécessite toujours un grand travail d'organisation et de négociation au niveau international, notamment avec les Principal Investigators (PI) d'instruments dont le PPS n'est pas toujours formellement partenaire. Ce type de campagne est nécessaire lorsque sont utilisés des instruments au champ de vue limité, qui a priori ne pointent pas tous les mêmes cibles sur le Soleil. C'est donc différent du rapatriement de données Soleil-entier en libre accès et provenant de divers instruments, qui est un autre mode de travail aussi très exploité au PPS. Chaque projet de campagne coordonnée, ou Joint Observing Programme (JOP), a été organisé autour des périodes d'observations que le PPS a obtenu sur le télescope THEMIS. En pratique, chaque demande de JOP sur des cibles que nous avons choisi a été faite auprès de chacun des instruments spatiaux (avec 4 à 5 instruments par satellite pour SOHO et HINODE) et au sol (avec plusieurs instruments européens) plusieurs mois avant la campagne. Chaque JOP a dû être accepté par chaque satellite trois mois avant par les PI, et chaque jour pendant la campagne par les opérateurs. Ce dernier point nécessite donc un suivi au jour le jour.

2.4 Activités de service :

2.4.1. Observations Systématiques et Surveillance Solaire :

Le Conseil Scientifique de l'Observatoire et le LESIA font fonctionner conjointement le service des observations systématiques du Soleil dans le visible avec le spectrohéliographe de Meudon, service labellisé SO6 INSU, qui assure la mise à disposition d'images solaires à la communauté internationale tous les jours de l'année. Les images sont insérées en temps réel dans BASS2000 à raison d'une douzaine par jour. 4 techniciens observateurs se relaient à temps partiel au chevet des instruments. Depuis 2008 s'ajoutent à la collection d'images spectroscopiques des images réalisées avec des filtres, de bien meilleure résolution spatiale, mais plus larges en bande passante. Ce service est intégré au réseau mondial d'observations H α (global H α network) et il soutient la mission CNES PICARD en ce qui concerne les observations en CaII. Les instruments travailleront également dans le cadre du projet FP7 SOTERIA dans les 3 ans à venir.

Le PPS assure aussi une surveillance radio du soleil à Nançay (USN). L'objectif est double : fournir à la communauté des observations complémentaires à celles d'autres instruments ; fournir des éléments pour la prévision des effets de l'activité solaire sur le milieu interplanétaire et l'environnement terrestre. Les observations du radiohéliographe (NRH) sont archivées à l'USN, et à Meudon sur BASS2000 et sur l'outil SecchiRH. Les observations intégrées sont disponibles en ligne dès le lendemain, et peuvent librement téléchargées. Parallèlement, des données sont préparées pour l'outil « Solar Weather Browser » de l'Observatoire Royal de Bruxelles. Cet outil permet un examen rapide de l'activité solaire à travers de nombreux instruments. L'interféromètre 3cm fournit quant à lui une fois par jour la localisation 1D des centres éruptifs sur le Soleil. Ces observations sont envoyées quotidiennement à CLS (filiale du CNES chargée de la prévision de l'activité) eu au SIDC de Bruxelles.

2.4.2. Centres de données BASS2000 et SECCHIRH:

BASS2000 est un service labellisé SO5 INSU, dont l'antenne meudonnaise est sous la responsabilité du PPS. En dehors de son activité principale d'archivage des données Soleil-entier de Meudon et de Nançay mentionnées ci-dessus, le PPS a entrepris plusieurs développements ces dernières années. Le PPS travaille actuellement à la finalisation de codes de détection automatique de structures sur les images du Soleil, et au développement de techniques de suivi temporel automatique de ces structures. Ce travail pourrait prendre une grande ampleur dans le cadre d'un futur programme européen en cours d'élaboration visant à construire un observatoire virtuel héliosphérique. BASS2000 y jouerait un rôle majeur en tant que responsable d'un workpackage. Il est prévu dans ce cadre de développer des outils statistiques permettant l'étude des structures, de leur évolution et de leurs inter connections. Par ailleurs, une discussion est en cours avec l'observatoire de Coimbra (Portugal), qui souhaiterait que leurs observations, similaires à celles du spectrohéliographe de Meudon, soient mises en ligne à BASS2000. Une réflexion sur la modernisation de l'interface de BASS2000 est en cours. Elle vise non seulement à améliorer l'ergonomie du site mais aussi à prévoir l'arrivée de nouveaux types de données et de résultats de traitements, notamment dans le cadre du programme SOTERIA.

BASS2000 héberge aussi le service d'extrapolation des champs magnétiques vers la couronne French Online Magnetic Extrapolations (FrOMagE), dont la direction est assumée par le CPhT de l'Ecole Polytechnique. Le PPS est responsable du développement des interfaces, d'une partie des codes numériques, de la prise en charge des calculs demandés par les utilisateurs et de l'analyse préliminaire des résultats. 3 chercheurs contribuent aux divers aspects de ce service, dont un pour la seule partie prise en charge et l'analyse des calculs. Ce service ne peut être automatisé, à cause de l'expertise requise dans le jugement de fiabilité et de qualité des résultats issus de différents types de codes, comme l'ont montré premièrement la quasi-totalité des requêtes de ce quadriennal deuxièmement la durée de plusieurs semaines qui s'est avérée être nécessaire pour la formation à l'utilisation et l'exploitation de ces codes à deux visiteurs étrangers. Ce service a produit une publication par an au cours de ce quadriennal.

De par sa position de CoI sur le package SECCHI de la mission STEREO, le PPS a ouvert en 2008 un nouveau service transversal SECCHIRH. Ce service constitue un monitoring radio ouvert à la communauté internationale, comme soutien officiel des projets spatiaux. Il fournit des données radios sol (ARTEMIS en Grèce, NRH et DAM à Nançay, et en projet le GMRT indien) et espace (WIND/WAVES et STEREO/SWAVES), ainsi que les caractéristiques des CME observées par STEREO/SECCHI (début, orientation, vitesse, et largeur) pour faciliter la sélection rapide des événements radios associés. SECCHIRH n'est pas une base de données, il fournit des données traitées, mises en forme et directement utilisables par une large communauté. Il est régulièrement fréquenté par plusieurs équipes.

2.4.3. Moniteurs à Neutrons :

Les moniteurs à neutrons sont des détecteurs de nucléons relativistes (énergie > 500 MeV) au sol. Ils mesurent essentiellement les neutrons issus de réactions de spallation des noyaux incidents avec l'atmosphère terrestre. Les particules primaires comprennent les rayons cosmiques modulés par le champ magnétique interplanétaire et, en moyenne une fois par an un flux transitoire généré par une grande éruption solaire. L'opération coordonnée des moniteurs dans un réseau international (environ 50 unités) couvrant toutes les latitudes et longitudes magnétiques est indispensable pour établir des spectres d'énergie et les directions d'arrivée. Les deux moniteurs français aux Iles Kerguelen et à Terre Adélie sont sous la responsabilité technique de l'Institut Paul Emile Victor (IPEV) ; la responsabilité scientifique, la calibration et la diffusion des données sont assurées par le PPS. Nous utilisons les moniteurs à neutrons pour deux raisons : (i) fournir des données de recherche sur les particules solaires de hautes énergies ; (ii) mener une activité de surveillance des doses d'irradiation reçues par le personnel navigant de l'aviation civile (système Sievert) et des problèmes de navigation liés par exemple aux erreurs qu'induit le rayonnement cosmique sur les ordinateurs embarqués. Cette activité nous procure un savoir-faire pour des études de prévision d'événements à particules solaires, notamment en coopération avec le CNES.

Les données des moniteurs sont reçues quotidiennement par liaison satellite. Des données réduites (moyennes horaires) sont distribuées par des centres mondiaux de données (Boulder, Toyokawa, Moscou). Les données françaises, y compris des événements à particules solaires, sont aussi diffusées en temps différé sur un serveur web de l'Observatoire de Paris, sur CD-ROM, ou à la demande par email. Pour améliorer l'utilisation des moniteurs et accélérer la diffusion des données, nous participons à la mise en place d'une base de données de tous les moniteurs européens, dans le cadre du projet FP7 NMDB.

2.5 Activités d'enseignement et de vulgarisation :

2.5.1. Enseignement :

- Cours de physique de l'activité solaire et stellaire au M2R de l'Obs. de Paris (depuis 2005)
- TP à Nançay sur l'interférométrie radio au M2R de l'Obs. de Paris
- Cours de plasmas planétaire au M2 de Planétologie de l'UPMC
- Cours de plasmas au M2 Environnement Spatial de l'Université d'Orléans
- Cours/TP d'optique à la Tour Solaire de Meudon au M1 de l'Obs. de Paris (depuis 2007)
- Cours d'astrophysique en L3 et L1 de l'Université d'Orléans
- Cours au DU de l'Obs. de Paris (en 2007)
- Cours de physique solaire à l'Université d'Oslo (jusqu'en 2006)
- Cours à deux écoles d'été de physique solaire et spatiale à l'Aquila en Italie (en 2006).
- Formation de volontaires civils à l'aide technique à l'IPEV de Brest
- Formation des professeurs stagiaires de l'IUFM, à Meudon fin 2007
- Cours et corrections de copies en physique pour le CNED
- Parrainage de classes de collège (3) et de lycée (1)
- Accueil de plusieurs stagiaires de 3^{ème} (environ 6 par an) et de TIPE (3)
- Encadrement de stagiaires universitaires de L3 (4), de M1 (3), de M2 (5)
- Encadrement de stagiaires d'écoles, de Sup'Optique (1), de l'ENSPS (8), de l'ENSEIRB (1)

2.5.2. Vulgarisation :

Le PPS a eu en charge l'organisation et la conduite de nombreuses manifestations vers le grand public au cours de ce quadriennal. Il a participé à la Fête de la Science et à des Journées Portes Ouvertes tous les ans, donnant des conférences et assurant les visites des observations systématiques du Soleil sur les sites de Meudon et de Nançay, visites conduites par des chercheurs,

des ingénieurs et des techniciens, et très appréciées du public. Il a aussi donné des conférences vers le public à la Fête de la Science de l'Université Pierre et Marie Curie (UPMC) en 2006 et 2007.

Le PPS a pris la responsabilité au niveau français d'organiser les manifestations de l'Année Internationale de l'Héliophysique (IHY) en 2007. C'est dans ce cadre que nous avons été l'un des 17 partenaires du projet européen Space Weather in Europe – an Educational Tool with the Sun (SWEETS), pour lequel nous avons contribué à l'élaboration d'une exposition itinérante dans un bus (que nous avons reçu à Meudon pendant 8 jours en Juin 2007), à un quizz et à la production d'un DVD de vulgarisation, le tout traduit en 8 langues. C'est toujours dans le cadre d'IHY que le PPS a été le commissaire d'une exposition « Du Soleil à la Terre », exposition réalisée par une agence Suisse, montrée en 3 langues, dont une large part du contenu scientifique et des illustrations ont été fournis par le PPS. Cette exposition circule dans plusieurs lieux publics dans les pays limitrophes de la Suisse. Cette exposition a été reçue et présentée pendant 6 semaines fin 2007 dans la salle Cassino de l'Observatoire de Paris, et elle a été accompagnée d'un cycle de conférences pour le public.

Les chercheurs, ingénieurs et techniciens du PPS ont contribué à la rédaction de plusieurs articles dans la presse scientifique grand public : dans Ciel et Espace, dans Science et Vie et dans le journal de la SAF (l'Astronomie). Ils ont aussi accueilli des journalistes de la télévision lors d'une éclipse partielle du Soleil à Meudon et pour un reportage du câble sur le métier d'astronome. Le PPS a aussi rédigé une page de vulgarisation sur l'émergence de flux magnétique sur le site Scholarpedia.

2.6 Autres activités nationales et internationales :

Les chercheurs du PPS sont impliqués dans différentes organisations scientifiques : la Division Plasmas de la SFP, le PNST (en tant que membre et que président), le groupe SHM du CNES, le SCOSTEP (en tant que vice-président à l'international et que président au niveau français), la SAF (rédacteur en chef adjoint), le COSPAR, la Section de Physique Solaire de l'EAS/EPS et le CESRA (en tant que président). Le PPS est aussi impliqué dans plusieurs contrats internationaux, au niveau européen dans le cadre du FP6 (un Research and Training Network : SOLAIRE pour l'étude de l'émergence de flux magnétique) et du FP7 (trois Collaborative Projects : NMDB pour la construction d'une base de données des moniteurs à neutrons, SOTERIA pour la surveillance solaire au sol, et EST/DS pour une design study du futur télescope EST), ainsi que dans le cadre de collaboration bilatérales avec l'Inde via le CEFIPRA (pour l'étude des relations Soleil-Terre), le Brésil et l'Argentine. Le PPS est aussi Principal Investigateur de DESIR sur SMESE et Co-Investigateur de plusieurs instruments spatiaux (voir la section 2.1).

Les chercheurs du PPS collaborent aussi de manière non-formalisée avec plusieurs laboratoires : au niveau national au sein de l'Observatoire de Paris (le LERMA et le LUTh), et avec l'IAS et le CSNSM d'Orsay, le LPCE d'Orléans, le LATT et le CESR de Toulouse et le Laboratoire Fizeau de Nice, et le LPG de Grenoble ; au niveau international avec plusieurs laboratoires en Allemagne, en Suisse, aux Etats-Unis, en Grèce, au Royaume Uni, en Hongrie, en République Tchèque, en Pologne, en Roumanie, en Russie, et en Chine.

3. Prospective du PPS pour 2010-2013 :

3.1. Un programme scientifique fédérateur et pertinent :

La moisson des résultats de l'ère SOHO, combinée au lancement récent de STEREO et de HINODE, ainsi qu'au développement massif des activités de modélisation numérique, ont conduit à lever un grand nombre de controverses de longue date en physique solaire. Mais beaucoup de

questions restent aujourd'hui très débattues sur la nature des mécanismes physiques qui régissent les phénomènes actifs du Soleil. Ce contexte permet donc aujourd'hui de mieux cibler les directions vers lesquelles les efforts doivent être poussés au niveau international. Dans ce cadre, les expertises du PPS nous conduisent à définir un projet scientifique fédérateur et pertinent pour le prochain quadriennal : **L'origine magnétique de l'accélération de particules durant les éruptions solaires.**

C'est un projet ambitieux à plusieurs titres, parce que l'observation directe de ces accélérations est hors de portée, ce qui implique de mettre en commun presque toutes les ressources de la physique solaire moderne. Pour mener à bien ce projet, des études connexes, historiquement présentées comme étant indépendantes, sont indispensables à conduire et à coupler entre-elles : (1) Mesurer des champs magnétiques non-potentiels dans la photosphère, la chromosphère et dans la couronne au-dessus des taches ; (2) Mettre en évidence les processus physiques de l'émergence et du déploiement des champs magnétiques vers la couronne ; (3) Quantifier les contraintes qui forment de nappes étroites de courants électriques, contraintes dues par exemple à la dynamique photosphérique ou au développement de CME dans la couronne ; (4) Etablir les conditions de déclenchement et la nature des couplages d'échelles pour la reconnexion magnétique au niveau de ces nappes de courant ; (5) Mesurer les signatures aux niveaux chromosphérique et héliosphérique des particules accélérées lors de la reconnexion.

3.2. Des projets pour porter le programme scientifique :

Afin d'apporter des avancées substantielles dans la thématique scientifique établie ci-dessus, le PPS devra s'impliquer directement dans le développement, et dans la conduite des opérations, pour des instruments de nouvelle génération (voir la section 2.3). Ces projets devront s'accompagner d'une exploitation continue des instruments existants, et aussi être soutenus par des instruments de surveillance. Ces derniers auront pour vocation non seulement de préciser le contexte des observations de pointe, mais aussi de participer à l'effort entrepris autour de la prévision de l'activité solaire pour les relations soleil-terre, de façon parallèle aux recherches fondamentales du PPS. Tous ces projets devront s'accompagner d'un renforcement de la composante modélisation MHD et accélération de particules, afin d'exploiter tous ses projets dans un cadre d'interprétation physique.

Le projet franco-chinois SMESE (**Small Explorer for Solar Eruptions**) du CNES, avec son instrument DESIR (Detection of Eruptive Solar Infrared Radiation) dont le PPS est PI, est idéal pour apporter réponse à la question (5) avec des observations sans précédent dans le domaine THz. La phase A de ce projet est arrivée à son terme, mais le CPS du CNES vient de recommander l'arrêt du projet. Des actions sont en cours pour redémarrer SMESE au plus tôt, afin de permettre le lancement de DESIR pour fin 2012 – début 2014. En effet, ces dates correspondent à la période la plus favorable pour la tenue des objectifs scientifiques de DESIR, avant la période suivante vers 2020. Les observations de DESIR devraient être complétées par des observations en rayons X durs et γ , c'est pourquoi le PPS est intéressé à l'exploitation de HEBS sur SMESE, et qu'il est CoI de du projet STIX (Spectrometer Telescope for Imaging X rays) proposé pour le **Solar Orbiter** de l'ESA, dont le lancement pourrait être envisagé à partir de 2015. Le projet EST (**European Solar Telescope**) de 4m pourra répondre aux questions (1,2,3) avec des mesures spectro-polarimétriques inédites à une résolution spatiale de 0,05 arcsec. Sa construction est souhaitée pour 2015-2019, et nous sommes membres du consortium européen dont l'objectif est de réaliser une design study dans le cadre du FP7 pour fin 2010. Le projet de grand interféromètre radio multi fréquences FASR (**Frequency Agile Solar Radiotelescope**) de la NSF, dont la mise en service est prévue à partir de 2011 et pour lequel le PPS a réalisé une étude de faisabilité de la partie basse fréquence, permettra quand à lui de répondre aux questions (1,3,5) par ses observations continues du Soleil dans une

bande de fréquence de largeur inégale de 50 MHz à 30 GHz. Le PPS est aussi très intéressé à l'exploitation scientifique d'autres projets dans lesquels il n'est pas techniquement impliqué, notamment les imageurs EUV de SDO (le Solar Dynamics Observatory de la NASA, prévu pour début 2009) et de LYOT (le package $\text{Ly}\alpha$ de SMESE). Ces observations devraient apporter des éléments de réponse aux questions (2,3). Reste la question (4) qui est difficile à traiter observationnellement, pour laquelle l'effort entrepris au PPS pour le développement d'une activité de modélisation devra se poursuivre, avec comme objectif de construire des grands **codes numériques en MHD et pour l'accélération de particules**, qui pourront être couplés entre eux, et qui pourront être utilisés pour l'interprétation directe des observations comme cela a été réalisé dans le passé avec les modèles d'extrapolation de champ magnétique et de calcul de la topologie du champ coronal.

Nombre des projets cités ci-dessus sont prévus pour être opérationnels d'ici la fin du prochain quadriennal, voire plus tard. Le PPS continuera donc à développer ses expertises en exploitant d'autres équipements, notamment les instruments dans l'espace de SOHO, STEREO, TRACE, HINODE et bientôt SDO. Le PPS compte aussi poursuivre son exploitation du **NRH** et de **THEMIS** au sol, ainsi que de **RHESSI** dans l'espace, afin maintenir et renforcer ses expertises en interférométrie radio, en spectro-polarimétrie, et en diagnostic des particules accélérées respectivement. Au cours du futur quadriennal, cet aspect sera essentiel pour **assurer la continuité avec les futurs projets** DESIR et EST, ainsi que STIX et FASR.

En parallèle, le PPS a pour objectif d'améliorer ses instruments de **surveillance solaire**, et les produits délivrés par ses **centres de données**. Bien qu'étant largement insuffisants pour répondre au projet scientifique du pôle, ces activités constituent un élément fondamental pour sa conduite. Les projets du quadriennal sont : développer une nouvelle voie d'observation $\text{H}\alpha$ rapide sur l'héliographe, pour le suivi à haute cadence temporelle des éruptions solaires et de leurs effets à grande échelle, en vue du prochain maximum d'activité solaire en 2010 ; la jouvence du spectrohéliographe en termes de CCD, pour améliorer significativement la qualité des observations (échantillonnage spatial et spectral) ; la reprise de l'activité de production de cartes synoptiques du Soleil à BASS2000, à présent de façon automatique en exploitant les codes de reconnaissance de formes récemment développés ; accélérer la diffusion des données des moniteurs à neutrons via une nouvelle base de données internationale, pour fournir les observations de Kerguelen en temps réel (1 min) et celles de Terre Adélie avec un délai réduit ; construire un nouveau spectrographe à Nançay, et étudier la possibilité d'installer à l'USN un instrument de mesure de flux dans les bandes décimétriques et centimétriques.

Pour conclure, le PPS considère que ses expertises en physique solaire et que son projet scientifique s'inscrivent totalement dans la perspective du développement d'une activité de **prévision de l'activité solaire** au niveau européen, notamment à moyen terme dans la cadre du programme « Space Situational Awareness ». Le PPS a donc naturellement participé à des activités de vulgarisation sur ce sujet avec le programme SWEETS, et il a répondu à un appel à idées du CNES pour son séminaire de prospective de 2009, pour la conduite d'un programme d'interaction entre scientifiques et industriels pour préciser le cadre d'une telle activité de recherche appliquée.

3.3. Une phase charnière pour la physique solaire à Meudon :

Fort de sa diversité et de sa renommée aux niveaux national et international, le PPS s'est constitué, pour le prochain quadriennal et à plus long terme, un programme scientifique original et ambitieux, avec des objectifs qui s'échelonnent sur plusieurs années. Ce programme a des applications potentielles en termes de prévision de l'activité solaire au niveau européen, une activité à laquelle le PPS souhaite aussi contribuer

En premier lieu, le programme du PPS s'appuie ses ressources humaines. Dans un contexte d'évolution du système de la recherche au niveau national, le PPS a fait appel à plusieurs agences de moyens au cours du précédent quadriennal. Les financements obtenus ont déjà permis le recrutement sur contrat de deux post docs, et la prochaine embauche de deux chercheurs contractuels et de deux thésitifs en cotutelle. Mais toutes les agences de moyens auxquelles nous pouvons avoir accès, y compris les agences nationales, offrent aujourd'hui des contrats pour des durées courtes de 1 à 3 ans seulement, et très difficilement renouvelables. Par ailleurs, la démographie des chercheurs permanents du PPS montre que 50% de ses effectifs auront 65 ans et plus à l'horizon 2015, et que 3 personnes seulement auront toujours moins de 50 ans en début du prochain quadriennal début 2010. Le rapport entre le nombre de chercheurs permanents et contractuels de courte durée au PPS va donc bientôt passer sous le seuil critique nécessaire à y assurer la conduite de projets scientifiques et instrumentaux d'envergure.

Le programme du PPS s'articule aussi autour de plusieurs instruments et réseaux de collaboration internationaux. Tous ces projets constituent autant de clés de voûte qui soutiennent le programme scientifique du pôle. Dans ce contexte, l'arrêt définitif de SMESE récemment recommandé par le CPS du CNES porterait un préjudice non négligeable à la prospective du PPS. Cet arrêt ferait aussi perdre au PPS non seulement son positionnement stratégique de PI sur un projet instrumental, mais aussi l'équipe technique compétente affectée à ce projet par le LESIA. Par ailleurs, l'absence de source de financement connue pour l'exploitation de THEMIS après Mai 2009 pourrait conduire, à moyen terme, à une perte d'expertise dans la conception et l'exploitation d'instruments de spectro polarimétriques, et par voie de conséquence à un affaiblissement du positionnement du PPS dans le projet EST.

Il est donc vraisemblable, qu'**après 100 ans d'une activité soutenue sur -et à l'origine de l'observatoire de Meudon, la recherche en physique de l'activité magnétique du Soleil est dans une phase charnière à l'Observatoire de Paris.** Dans le contexte actuel, il n'est pas question pour le PPS de discuter s'il doit s'autocensurer dans ses projets, ou bien se dissoudre dans plusieurs autres équipes de l'Observatoire de Paris, dans lesquelles certaines de ses expertises pourraient certes s'insérer, mais de façon très partielle et surtout disjointe. Ces deux options conduiraient invariablement à la fin d'une activité en physique solaire organisée, et historique, à l'observatoire de Meudon, alors même qu'elle est dans une phase très active et reconnue au niveau international.

Dans une perspective de pérennisation de sa dynamique nouvelle, **il est fondamental que le PPS puisse s'adjoindre très rapidement les talents de plusieurs jeunes chercheurs** qui y candidatent, et il est impératif que certains d'entre eux puissent apporter leur investissement à temps plein et à long terme, non seulement pour participer à la conduite des projets soutenant le programme scientifique (**en premier lieu la MHD, SMESE et EST**, et ensuite la prévision de l'activité solaire, la modélisation de l'accélération de particules, FASR et STIX), mais aussi pour encadrer de nouveaux stagiaires et thésitifs. Dans cette même optique, le PPS devra aussi **renforcer ses équipes techniques** travaillant sur ses activités d'observations systématiques pour la surveillance solaire, et sur le développement des centres de données associés que sont SECCHIRH et BASS2000. Aussi, la conduite des projets instrumentaux du PPS nécessitera de nouveaux financements nationaux pour permettre leur implémentation, afin **d'assurer un positionnement international solide et crédible pour la physique solaire à l'Observatoire de Paris.** Pour le PPS la première priorité est de **faire redémarrer DESIR à court terme**, et la seconde est **d'obtenir les moyens de réaliser des prototypes de packages que le PPS a proposé pour EST**, à savoir un polarimètre à cristaux liquides et un spectro-imageur de type DPSM.