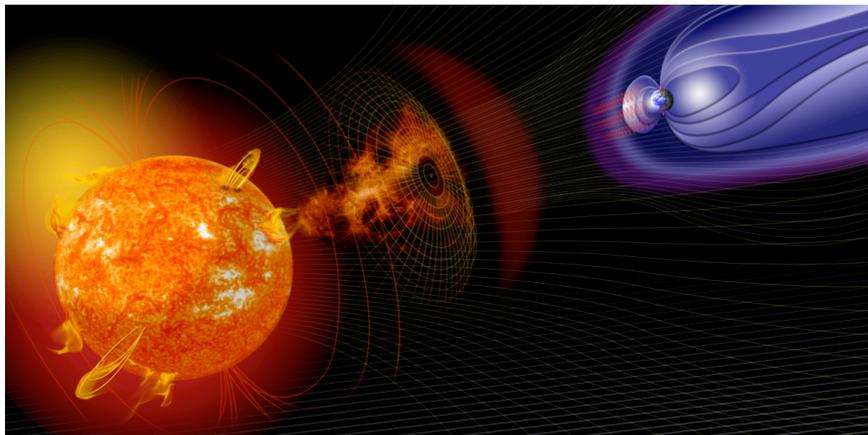


**Programme National
Soleil – Terre
(PNST)**

2014-2019

Rapport « Bilan & Perspectives »

Rédigé par le Conseil Scientifique du PNST



PLAN

Bilan 2014-2019 et prospective du PNST: résumé	4
Bilan et perspectives scientifiques	11
Couplage entre les différentes enveloppes de plasma.....	11
Contexte.....	11
Bilan 2014-2019	11
Perspectives :	24
Transport d'énergie multi-échelles et turbulence	25
Contexte.....	25
Bilan 2014-2019	25
Perspectives.....	31
Mécanismes d'accélération et de chauffage du plasma.....	32
Contexte	32
Bilan 2014-2019	32
Perspectives	43
Activité éruptive ou impulsive dans les plasmas	45
Contexte.....	45
Bilan 2014-2019	45
Perspectives	51
Météorologie de l'espace	53
Contexte	53
Faits marquants.....	53
Investissement de la communauté dans des projets de recherche en ME:	58
Perspectives	62
Moyens, services et outils.....	65
Instruments au sol	65
Contexte	65
Instruments à audience internationale	65
Instrumentation spatiale	77
Contexte	77
Instrumentation en opération ou livrée	77
Bases et services de données.....	83
Contexte	83
Les services.....	83
Outils numériques.....	98
Interfaces avec les autres programmes nationaux de l'INSU.....	99
PNP	99
PNPS	99
Autres collaborations	100
Bilan administratif et financier.....	101
Périmètre du programme	101
Laboratoires associés	101
Ressources humaines	101
Structure du programme	102
Conseil Scientifique.....	102
Animation	103
Budget du programme	103

Origine des crédits.....	103
Financement.....	104
Animation scientifique.....	105
Répartition des demandes.....	105
Publications.....	106
Annexes	108
Annexe 1: Récapitulatif des expertises françaises en instrumentation spatiale.....	108
Annexe 2: Codes numériques	111
Annexe 3: Recommandations des groupes de travail organisés au colloque de renouvellement du PNST	118

Bilan 2014-2019 et prospective du PNST: résumé

Le système couplé Soleil-héliosphère-Terre est un exemple proche d'un plasma astrophysique, dont nous pouvons étudier les processus physiques avec une approche multi-messager combinant des observations à distance (ondes électromagnétiques des rayons gamma aux ondes radio) et des mesures in situ (plasma, champ magnétique, particules, ondes). Le champ magnétique généré à l'intérieur du Soleil pénètre dans son atmosphère et la structure. Il semble aussi conduire au chauffage de cette atmosphère et à son expansion dans l'espace interplanétaire, dont les mécanismes restent un sujet mal compris de la physique des atmosphères stellaires. Les couplages entre les plasmas d'origine solaire et les magnétosphères et ionosphères des planètes et autres corps du système solaire se font au travers de processus à multiples échelles spatiales, décrits selon les échelles par la magnétohydrodynamique, les théories multi-fluides ou cinétiques. Les processus mis en jeu sont par nature fluctuants, allant de la turbulence des milieux en apparence calmes aux grandes perturbations déclenchées par l'activité éruptive du Soleil.

Le PNST a émergé, dans les années 1990, de la reconnaissance que les processus plasma similaires avaient lieu dans l'atmosphère solaire et les environnements ionisés des planètes, et que les recherches avaient tout intérêt à se coordonner. Cette évolution de la recherche en France accompagnait celle des grands projets spatiaux de la discipline, comme *SoHO*, *Cluster*, *STEREO*. Elle se poursuivra dans la décennie à venir avec les missions *Parker Solar Probe* (NASA) et *Solar Orbiter* (ESA, NASA).

Le système Soleil-vent solaire-Terre reste un système privilégié de l'interaction étoile-planète qui revêt aussi un intérêt particulier pour les applications en météorologie de l'espace. Un nombre croissant de technologies et d'activités humaines est concerné par les perturbations de notre environnement plasma. La communauté PNST s'est montrée apte à fournir, à partir de ses activités de recherche, des contributions aux réflexions et un soutien des activités opérationnelles des utilisateurs.

Grandes questions

L'objectif du PNST est la compréhension de la ligne de transmission depuis le Soleil jusque dans l'environnement spatial proche, avec une caractérisation de son impact environnemental. Comment le Soleil, étoile d'un type courant, génère et transforme-t-il du champ magnétique ? Comment l'environnement ionisé et magnétisé d'une planète réagit-il aux perturbations par son étoile ? La spécificité du programme est de privilégier une approche instrumentale duale orientée plasma, au travers de mesures multi-messagers au sol et dans l'espace et d'une étroite coopération entre observations, simulations numériques et théorie.

Le spectre de recherche balaie la diversité d'échelles spatiales et temporelles des mécanismes d'émission, de transport et de couplages dans les plasmas naturels de l'héliosphère : (1) processus de génération et d'évolution du champ magnétique, (2) processus éruptifs ou impulsifs de conversion d'énergie, (3) mécanismes d'accélération et de chauffage, (4) transport d'énergie et de matière, (5) rôle de la turbulence, (6) interactions aux interfaces entre plasmas de différentes origines.

Faits saillants

Un mécanisme au cœur des phénomènes explosifs dans les plasmas naturels est la reconnexion magnétique, qui modifie brutalement la connectivité des lignes de champ magnétique dans les nappes de courant électrique à l'interface entre les plasmas de différentes origines. On voit ce

processus à l'œuvre dans l'héliosphère, mais aussi dans des environnements astrophysiques lointains, par exemple dans les processus d'accrétion et d'évacuation du moment cinétique. La reconnexion magnétique a longtemps été un sujet peu contraint par des observations et modèles. Le développement de simulations numériques et la conception d'instruments spatiaux avec haute résolution en imagerie (atmosphère solaire) et mesures in situ (particules et ondes dans et autour de la magnétosphère) ont conduit à des progrès substantiels que nous illustrons ici avec deux sujets abordés par le PNST dans les dernières années.

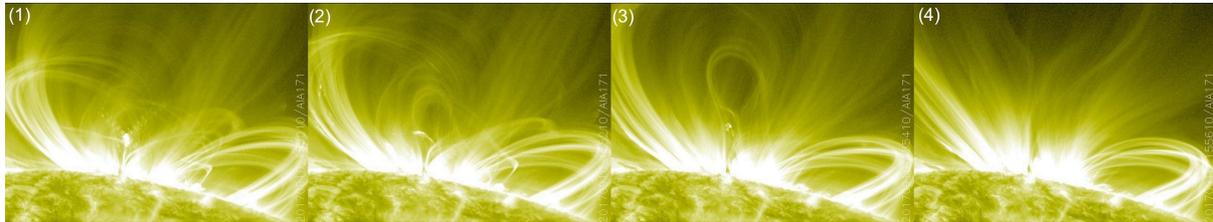


Figure 1. Séquence de quatre images en EUV ($\lambda=17,1$ nm) lors d'une éruption solaire, observée par l'instrument Atmospheric Imaging Assembly (AIA) du satellite Solar Dynamics Observatory (SDO; NASA). Image fournie par J.-M. Malherbe, Observatoire de Paris, LESIA.

La haute cadence d'imagerie en EUV (12 s) qu'offre le satellite SDO (NASA) montre comment la morphologie du champ magnétique coronal évolue au cours d'une éruption (Figure 1). Cette observation détaillée confirme le schéma 2D où une structure magnétique de type plasmöide se forme (épisodes 1, 2), monte dans la couronne (2, 3) et est expulsée dans l'espace (4) sous forme d'une éjection coronale de masse (CME). La transition de la morphologie des images EUV à la compréhension de l'évolution de la structure magnétique se fait au travers de l'extrapolation dans la couronne des mesures du champ magnétique dans la photosphère. La modélisation magnétohydrodynamique (MHD) permet de localiser les nappes de courant électrique où la reconnexion magnétique a lieu et trace les chemins par lesquels l'énergie libérée est transportée dans la basse atmosphère. Ces travaux montrent que la structure vue comme un plasmöide en 2D en projection sur le plan du ciel est un tube de flux magnétique torsadé. Il émerge de ces travaux un modèle standard en 3D des éruptions et éjections de masse dont le tube de flux magnétique torsadé et son instabilité sont le cœur physique. L'onde de choc qui peut se développer en amont du tube de flux et la reconnexion magnétique en aval sont des sites d'accélération des particules. La reconnexion magnétique se développe dans des régions où la connectivité des lignes de champ change brusquement, appelées régions quasi-séparatrices. Ce sont des généralisations des régions à champs magnétiques opposés des schémas 2D simples. Leur topologie entraîne des modes spécifiques de reconnexion dont le développement prédit par les modèles MHD est confirmé par la morphologie des images EUV à haute cadence.

Tandis que la MHD décrit l'évolution des structures macroscopiques du champ magnétique et permet d'identifier la localisation de la reconnexion, elle ne donne pas accès aux processus à l'échelle sub-télescopique où l'énergie est convertie lors de la reconnexion. La mission *Magnetospheric Multiscale Mission* (MMS), constituée de quatre satellites, a permis de nombreuses observations détaillées résolvant les îlots magnétiques avec des tailles typiques du mouvement des ions dans la magnétogaine de la Terre, entre la magnétosphère et l'onde de choc.

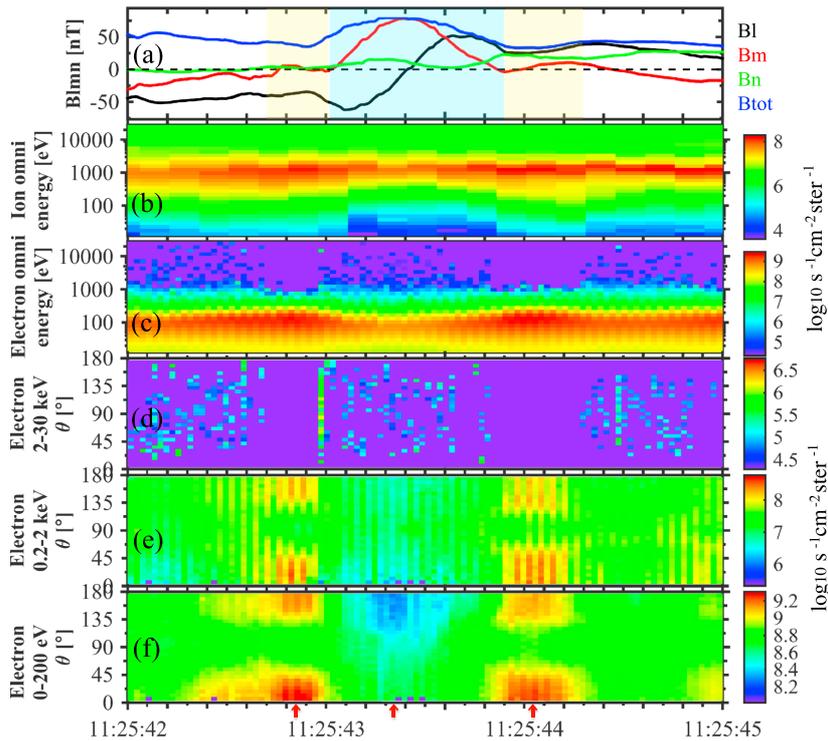


Figure 2. Champ magnétique (a) et populations de particules (b-f) mesurées par la sonde Magnetospheric Multiscale Mission (MMS; NASA) lors de la traversée d'un îlot magnétique dans la magnétogaine de la Terre. Figure de Huang et al. (2016 GRL).

La Figure 2 montre les observations lors du passage dans un îlot magnétique : on voit (panneau a) une augmentation de l'intensité totale du champ magnétique (courbe bleue) et sa rotation (courbe noire). Tandis que le champ magnétique est renforcé, la densité des électrons est réduite dans l'îlot (panneau c), tout comme la densité des ions de basse énergie (b). L'îlot est une structure proche de l'équilibre magnétohydrodynamique. Les panneaux (e) et (f) montrent que la sonde observe des faisceaux d'électrons énergétiques alignés au champ magnétique (angles d'attaque autour de 0°) et en direction opposée (180°) sur les bords de l'îlot magnétique. A l'intérieur, des faisceaux d'électrons énergétiques alignés au champ sont vus. Divers types d'ondes, potentiellement dus aux instabilités faisceau d'électrons – plasma, sont observés. Elles démontrent comment des électrons peuvent être accélérés et chauffés dans ces structures. MMS a commencé à apporter une moisson d'observations offrant des vues détaillées des processus de reconnexion magnétique à l'échelle de la région de diffusion des électrons.

Evolution marquant

Les relations Soleil-Terre restent l'axe central du PNST avec des thématiques qui impliquent aussi les relations Soleil-planètes, principalement dans les environnements plasma magnétisés. Les missions STEREO et MMS ont renforcé la cohésion du programme entre physique solaire et géophysique externe grâce, notamment, aux observations multi-points de la dynamique des échelles spatiales et temporelles des processus impliqués. Ces études seront au cœur des missions *Parker Solar Probe* et *Solar Orbiter*. En soutien aux grands projets spatiaux, la communauté fournit des données sol et des efforts importants de modélisation de cette dynamique dans les différentes régions critiques du système : la dynamo solaire, les instabilités plasma dans la couronne et la magnétosphère, les processus d'accélération des particules au niveau des régions interfaces et les effets des interactions Soleil-Terre dans l'environnement spatial proche de la Terre.

Les dernières années ont vu une demande accrue d'informations et de services sur la météorologie de l'espace de la part d'organismes en dehors de la recherche. Pour y répondre, nous avons créé l'*Organisation Française pour la Recherche Appliquative en Météorologie de l'Espace* (OFRAME), soutenue par l'INSU, le CNES, le CEA et l'ONERA, qui vise à favoriser les échanges entre milieu scientifique et grands opérateurs (transfert de savoir-faire et de données vers les utilisateurs; retour d'expérience des opérateurs vers les groupes de recherche). Cette démarche s'avère d'autant plus pertinente que la France, au travers de Météo France, héberge l'un des trois centres sélectionnés en 2018 par l'OACI pour un service mondial de météorologie de l'espace pour l'aviation civile.

Évolutions thématiques

Les thématiques du PNST visent à appréhender la complexité de l'environnement spatial dans lequel nous évoluons. Ainsi, partant d'une héliosphère divisée en grands domaines : Soleil, vent solaire, magnétosphère, ionosphère, thermosphère, nos axes de recherche ont évolué vers la compréhension des interactions entre les domaines. Ce processus culminera dans les années 2020 avec les missions *Parker Solar Probe* et *Solar Orbiter*. Une partie de nos thématiques évoluera également vers la dynamique des interactions entre l'environnement externe, magnétisé, et l'atmosphère (haute et moyenne) de la Terre.

En même temps, l'étude des interactions autour d'autres environnements planétaires est une nécessité afin de mettre la diversité des interactions observées à profit pour la compréhension du système Soleil-Terre. Notamment, qu'elle soit intrinsèque ou induite, l'existence d'une magnétosphère semble cruciale pour le développement de la vie sur une planète. Ce sont les recherches dans l'héliosphère qui révèlent les conditions d'existence et l'évolution des magnétosphères, créant ainsi la base de la compréhension des systèmes planétaires extra-solaires.

Interdisciplinarité et interfaces

L'héliosphère est un laboratoire naturel pour aborder des problématiques scientifiques plus larges, qui traduisent la démarche transdisciplinaire du PNST et sa coopération avec d'autres programmes nationaux:

- interactions thématiques avec le PNP autour des environnements plasmas magnétisés et la dynamique de la haute atmosphère planétaire (ionosphère).
- Interfaces avec le PNPS autour de la structure interne des étoiles de type solaire et leur activité : dynamo et magnétisme stellaire.
- Interface avec le PNHE autour des mécanismes d'accélération des particules et d'émission de photons énergétiques.
- Interface avec PCMI, principalement autour du Pôle Thématique National "Atomes et molécules".
- Interdisciplinarité avec la communauté Océan-Atmosphère au travers des couplages entre l'environnement plasma de la Terre et son atmosphère, notamment dans une approche globale de changement climatique : couplages entre la thermosphère et la magnétosphère (électrodynamique et chimie) et effet des particules énergétiques sur la composition de l'atmosphère moyenne (TARANIS).

Pour favoriser les interactions, le PNST et le PNP ont un membre commun dans leurs CS. Il sera opportun de réfléchir à une initiative similaire avec le PNPS. Par ailleurs, les interactions se

concrétisent par la co-organisation de certains ateliers aux journées scientifiques de la SF2A (notamment PNPS et PNP, autour de l'interaction étoile-planète, et PNHE, autour des particules de haute énergie). Enfin, la création d'un GDR "électricité atmosphérique" serait pertinente dans la perspective de développer des activités transdisciplinaires AA et OA autour de la question des couplages entre magnétosphère et atmosphère moyenne.

Forces et faiblesses

La force principale de la communauté PNST est sa reconnaissance au niveau international :

- forte coopération internationale ;
- reconnaissance de nos compétences en instrumentation (la France est le seul contributeur à l'instrumentation hors USA de la mission *Parker Solar Probe*) ;
- expertise reconnue dans les bases de données, qui sont des références au niveau international.

Par ailleurs, le PNST a contribué à renforcer la cohésion en assurant un pavage cohérent des thématiques relevant du programme :

- les équipes françaises couvrent l'ensemble des compétences de recherche dans les domaines des interactions soleil-vent solaire-magnétosphère-ionosphère-atmosphère neutre ;
- il y a une très bonne synergie modélisation-observation-bases de données.

Enfin, les thématiques abordées par le programme sont de nature à garantir un retour sociétal fort au travers des activités liées à la météorologie de l'espace, que le programme mène aussi avec les acteurs en dehors de la recherche.

La dynamique de la communauté est obérée par le vieillissement du personnel : la quasi-totalité des domaines d'expertise du PNST est impactée par le non-remplacement des départs en retraite.

- Notre capacité à contribuer à l'instrumentation est affaiblie ;
- On note la réduction des contributions PI à la mission Solar Orbiter par rapport à la mission SoHO et l'incapacité de participer de façon significative à de nouveaux grands projets sol en physique solaire ou physique ionosphérique.

De fait, il y a un risque réel d'extinction de certaines activités dans les années à venir dans des domaines clés de la discipline. On observe en même temps la montée en puissance des activités de simulation numérique, qui font partie des forces de la communauté. Ce fait garantit que la communauté pourra continuer à jouer un rôle important dans la recherche internationale. Mais le relâchement de notre implication dans les projets instrumentaux est préoccupant et appelle une réaction des tutelles.

Par ailleurs, nos thématiques scientifiques sont fortement impactées par l'orientation programmatique de l'ESA, qui s'éloigne des besoins de notre communauté, notamment en physique de la magnétosphère terrestre :

- On note la non-sélection de projets ambitieux comme THOR (M4) ou ALFVEN (M5).
- Il n'y a pas de mission solaire ambitieuse post Solar Orbiter.

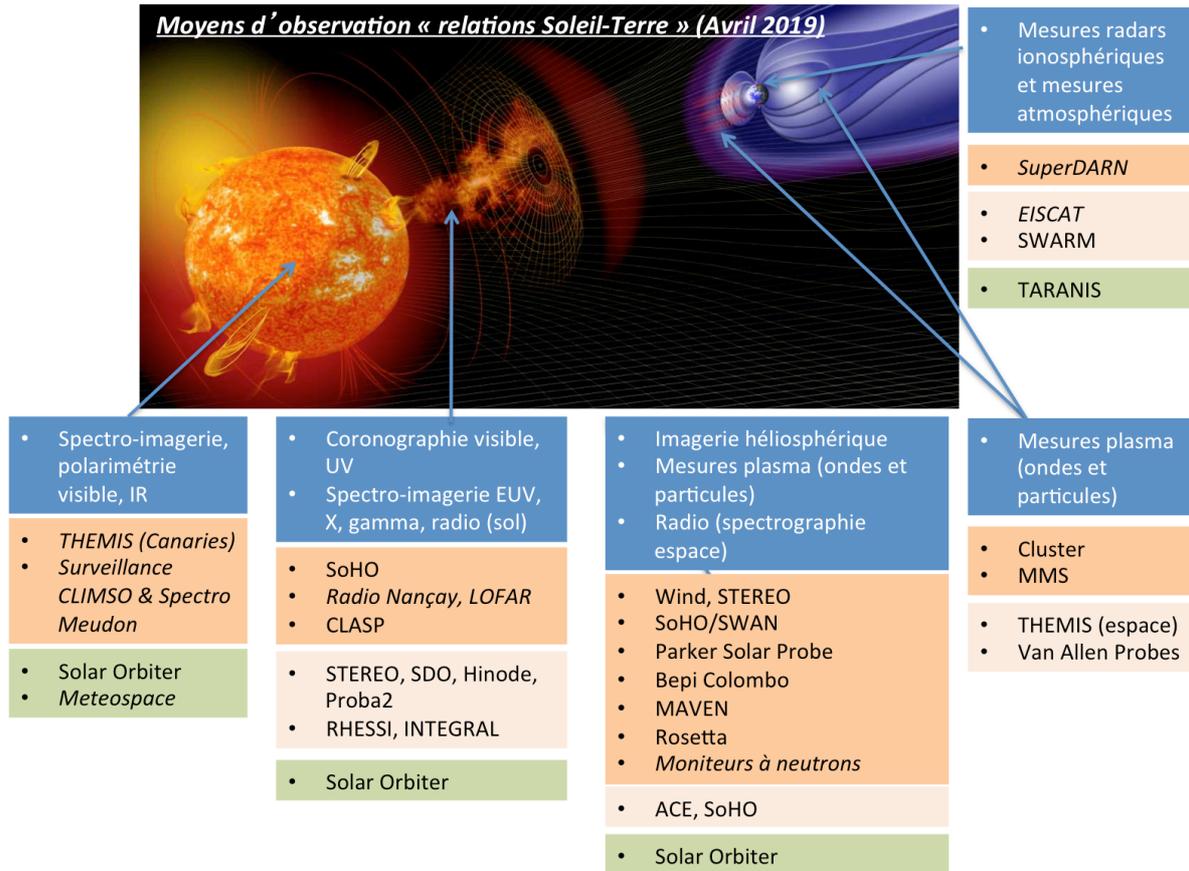


Figure 3. Instrumentation sol (italiques) et espace existante avec une implication majeure du PNST (orange soutenu) et où le PNST contribue à l'exploitation scientifique (orange clair), projets planifiés (cadres verts).

Moyens et priorités

La Figure 3 résume les instruments dans lesquels le PNST est impliqué, en distinguant les différents domaines du système Soleil-Héliosphère-Terre. Les cadres en bleu donnent la technique générique, les cadres en orange soutenu les instruments sol et missions spatiales avec responsabilité d'ensemble (PI) d'un groupe PNST ou la fourniture d'instrumentation, les cadres en orange claire les instruments où le PNST contribue de façon significative à l'exploitation scientifique.

Il ressort de cette figure que le PNST joue un rôle majeur au niveau international dans la conception et l'opération d'instruments de recherche dans toute la chaîne Soleil-Terre. L'expertise du PNST se trouve confirmée par le fait que les seuls instruments de *Parker Solar Probe* qui ne viennent pas des Etats Unis ont été fournis par des laboratoires français. Il est aussi à souligner que *TARANIS* est une mission française. Les recherches autour de *Parker Solar Probe* et *Solar Orbiter* structureront la communauté dans les années à venir dans des thématiques du PNST développées depuis *SoHO* et *Cluster*. Le PNST y contribuera par des travaux en simulation numérique et théorie et par l'opération d'instruments au sol.

La priorité que le PNST attribue aux instruments au sol découle de leur soutien aux grands axes de la recherche : les instruments d'observation du Soleil en ondes radio et lumière visible sont un apport essentiel au retour scientifique de *Solar Orbiter* et *Parker Solar Probe*, parce qu'ils fournissent des vues de l'activité dans la couronne et la basse atmosphère solaires qui ne sont pas accessibles depuis les sondes spatiales. Le même argument vaut pour les radars ionosphériques. *THEMIS* (Canaries)

vient de sortir d'une opération majeure qui devrait lui donner un rôle renforcé dans l'observations du Soleil visible à haute résolution spatiale, en plus de sa spécificité en spectropolaïmétrie. L'instrument devient ainsi un outil précieux avant l'avènement des grands télescopes solaires optiques et en particulier EST. Le PNST attribue une priorité inférieure à EST, puisque, à cause de la diminution des effectifs, la communauté française ne pourra être un moteur du projet. Il est néanmoins souhaitable que les compétences individuelles existant au sein du PNST puissent contribuer au développement et à l'exploitation d'EST si le projet est réalisé.

Moyens actuels :

	P0	P1, P2
Espace	SoHO, STEREO, Cluster, MMS, Parker Solar Probe, Bepi Colombo <i>Solar Orbiter, Taranis</i>	THEMIS (NASA), SWARM
Sol	Surveillance radio Nançay: NRH, ORFEES (Soleil), NDA (Soleil et Jupiter) THEMIS (Canaries), <i>Meteospace</i> SuperDARN (Iles Kerguelen), EISCAT	LOFAR, MWA

Les projets en *bleu* sont des projets mis en œuvre dans un futur proche. Bepi Colombo est en clair, parce que la mission ne fournira pas encore de données dans les cinq ans à venir (arrivée vers Mercure fin 2025).

Moyens à venir :

	P0	P1, P2
Espace	Implications fortes dans des missions d'opportunité: - physique solaire (spectro-polarimétrie) - magnétosphère/vent solaire, turbulence	L4/L5 météorologie de l'espace Nanosats environnement terrestre Missions en rayons X: FOXSI Magnétosphères planétaires
Sol		EST, NenuFAR, SKA, ELT Surveillance de l'ionosphère, EISCAT 3D

Dans ces tableaux les petits instruments de surveillance du Soleil (visible : spectrohéliographe Meudon, CLIMSO) et du rayonnement cosmique (moniteurs à neutrons) dont le maintien en opération est relativement peu coûteux ne sont pas mentionnés dans ces tableaux. Ces instruments resteront des éléments clefs des recherches, et des services en météorologie de l'espace.

Bilan et perspectives scientifiques

Couplage entre les différentes enveloppes de plasma

Contexte

Les processus de couplage à l'interface entre les plasmas de différentes origines sont la clef pour comprendre comment fonctionne le transport d'énergie dans les plasmas héliosphériques et comment est alimentée la variabilité de l'environnement spatial de la Terre. Le couplage entre l'intérieur et l'atmosphère du soleil structure le champ magnétique dans l'atmosphère solaire et conduit au stockage d'énergie. Le couplage entre les structures de la couronne et le milieu interplanétaire conduit au vent solaire et régit l'évolution des éjections de masse (CME) lors de leur propagation interplanétaire. Finalement le couplage entre le vent solaire et les différentes couches de l'environnement plasma de la Terre, la magnétosphère et l'ionosphère, engendre une grande partie de la variabilité de l'environnement spatial de la Terre. Le couplage entre l'ionosphère et l'atmosphère neutre est un sujet assez récent qui complète la chaîne des relations Soleil-Terre, et où se joue aussi la question de l'influence solaire sur la variabilité du climat terrestre.

L'étude des interfaces s'appuie sur des observations à distance et les mesures in situ avec de hautes résolutions spatiales. En physique solaire, les sondes *Solar Dynamics Observatory* (NASA) et *Hinode* (JAXA) continuent à être des outils de premier plan. Néanmoins, l'observation à distance ne résout pas les détails cinétiques des processus de couplage. Il faut des mesures in situ, pour lesquelles l'environnement spatial de la Terre est un terrain de choix. Le lancement de la sonde *Magnetospheric Multiscale Mission* (MMS), le 12 Mars 2015, était un fait marquant de la période 2014-2019. Cette mission comporte une contribution instrumentale de la communauté française avec pour objectif l'étude de la physique de la reconnexion entre le champ magnétique interplanétaire et le champ magnétique terrestre à l'échelle électronique. D'autres missions nous ont permis d'explorer des processus de couplage dans d'autres environnements plasma de l'héliosphère. La mission *Rosetta*, sur laquelle la communauté française est aussi impliquée, a permis d'étudier de façon détaillée la formation et l'évolution d'une magnétosphère cométaire lors de son passage au périhélie. La sonde *MAVEN*, dédiée à l'étude des couplages thermosphère-ionosphère-vent solaire et de l'échappement atmosphérique de Mars a aussi été mise en orbite en Septembre 2014 et les premières mesures ont permis entre autre de mettre en évidence l'importance des événements solaires dans l'érosion de l'atmosphère de Mars. Dans ce domaine, comme dans les autres traités dans la suite, la simulation numérique est indissociable des progrès que les nouveaux outils d'observation apportent à notre compréhension.

Bilan 2014-2019

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

Dans l'étude du couplage entre l'intérieur solaire et la couronne, la basse atmosphère solaire (photosphère et chromosphère) représente une zone d'interface à plusieurs titres : tout d'abord entre un milieu optiquement transparent (la couronne) et un milieu opaque non directement observable (l'intérieur solaire). Mais c'est aussi une zone d'interface magnétique entre deux milieux dominés d'une part par les mouvements du plasma (paramètre $\beta \gg 1$ pour l'intérieur solaire), d'autre part par le champ magnétique (paramètre $\beta \ll 1$ pour la basse couronne solaire). L'étude de cette zone d'interface est donc particulièrement importante pour comprendre le couplage intérieur solaire-couronne.

Le mécanisme dynamo est un sujet commun à la physique solaire et la physique stellaire. Les simulations numériques de dynamo des étoiles de type solaire sont essentielles pour interpréter les observations. Le groupe LDE3 du CEA est très actif sur ce sujet et plusieurs travaux (Augustson et al. 2013, 2015, Brun et al. 2017, Strugarek et al. 2016, 2017, Varela et al. 2016, Emriau & Brun 2017) ont permis d'isoler le régime de paramètres où la solution dynamo possède à la fois un cycle régulier, des renversements de polarité et même des grands minima d'activité. Généralement, les simulations sont capables maintenant de produire des cycles variés, même si le rôle exact des différents mécanismes et régions (rotation différentielle, tachocline, ...) aux propriétés des cycles n'est pas encore maîtrisé. Ceci est bien décrit dans une revue sur le sujet (Brun 2017). Strugarek et al. (2017) ont pu déduire des simulations une loi d'échelle sur la durée des cycles magnétiques en fonction de différents paramètres qui permettent de replacer le Soleil dans un contexte astrophysique.

La dynamique des régions calmes de l'atmosphère solaire, loin des centres actifs, est dominée par la présence de granules et supergranules, marqueurs photosphériques des mouvements de convection se déroulant dans l'intérieur solaire. Les mouvements des granules et leur fragmentation ont ainsi été étudiés, en lien avec le réseau magnétique qui dessine les supergranules [Malherbe et al. 2015, 2018 ; Roudier et al. 2016, 2017].

La possibilité de mesurer des courants électriques dans l'atmosphère solaire est un succès des développements de la magnétographie vectorielle et de son déploiement dans l'espace. L'étude des courants injectés depuis l'intérieur solaire a permis de montrer que les émissions UV des ions multichargés se situent sur le ruban d'éruption à courant montant [Janvier et al. 2014, 2017 ; Musset et al. 2015, Masson et al. 2017, Fleishman et al. 2018]. La manière dont sont injectés ces courants a aussi été mise en avant à partir de simulations MHD (Török et al. 2014 ; Dalmasse et al. 2015).

L'étude de l'interface intérieur-atmosphère s'appuie aussi sur différentes techniques de mesures et sur le développement de modèles MHD de plus en plus sophistiqués. Au cœur de cette problématique se situe la compréhension de l'origine du champ magnétique via l'effet dynamo non-linéaire ainsi que son transport jusqu'à la couronne solaire et son prolongement sous forme de vent.

La Figure 4 montre les résultats du modèle 3-D MULTI-VP de la formation du vent solaire depuis la chromosphère jusqu'à la couronne (Pinto & Rouillard, 2017). Ce modèle calcule des solutions de vent simultanément le long d'un large échantillon de tubes de flux magnétiques traversant toute l'atmosphère solaire. Cette stratégie permet d'échantillonner des régions entières de la couronne et de calculer les vitesses du vent solaire plus correctement et plus rapidement que ce qui est possible aujourd'hui avec des modèles globaux multidimensionnels. La méthode numérique est basée sur un code numérique MHD de vent solaire dans un tube de flux 1D incluant les couches chromosphériques et un traitement thermique avancé (Pinto et al. 2009, Grappin et al. 2010). La figure met en évidence le lien étroit entre la topologie du champ magnétique coronal reconstruit à partir de magnétogrammes (au centre) et les zones de formation des vents solaires lent et rapide. Cette figure illustre aussi le lien entre la position des grands jets ("streamers", image coronagraphique simulée) avec des observations de SOHO et STEREO, et les régions sources du vent solaire lent.

Des modèles MHD de vents solaire/stellaire multi-D (Réville et al. 2015a,b, 2016, 2017) prenant en compte des effets essentiels nouveaux sont en train d'être couplés de façon dynamique avec des modèles de dynamo interne: effets de géométrie magnétique liés à la dynamo interne et amenant à une activité magnétique cyclique (changement des amplitudes relatives des familles dynamos symétriques et anti-symétriques) ou plus intense (phase jeune champ magnétique et rotation plus forte).

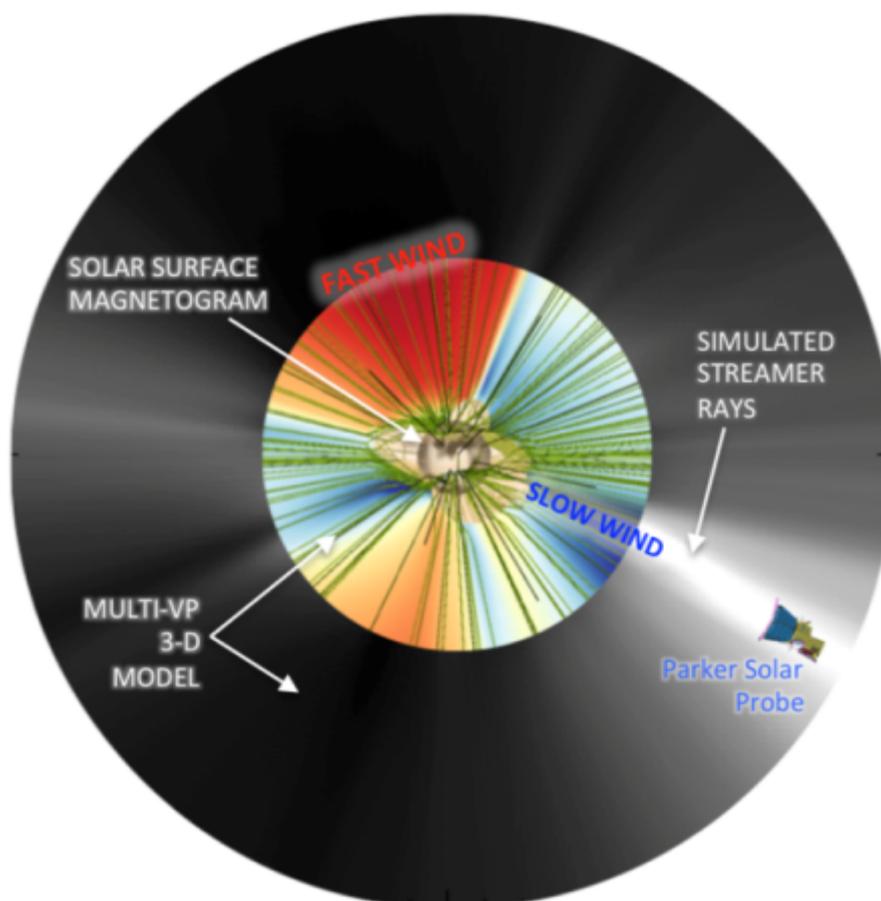


Figure 4. Couplage aux interfaces: modèle MULTI-VP 3-D chromosphère-couronne-vent solaire. Depuis le centre vers l'extérieur: magnétogramme solaire, reconstruction du champ magnétique en vert, le code de couleur correspond aux vitesses du vent solaire (rouge: rapide, bleu: lent). La partie extérieure de l'image est une image coronagraphique simulée à partir des cubes 3-D issus de MULTI-VP (Pinto & Rouillard 2017).

Parmi les nouvelles techniques de mesures développées par la communauté française pour caractériser l'interface intérieur-atmosphère du Soleil, on peut citer :

- 1) La détermination de champs de vecteur magnétique et de vitesse ainsi que des propriétés thermodynamiques de la basse atmosphère solaire à partir de mesures spectrales et spectropolarimétriques (Bommier et al. 2016, Mein et al. 2016). L'objectif de la mission fusée sonde CLASP (*Chromospheric Lyman alpha Spectropolarimeter*), lancée le 3 Septembre 2015, est de déterminer le champ magnétique dans la chromosphère solaire à partir de mesures spectropolarimétriques de la raie Lyman alpha de l'hydrogène neutre (121.6 nm). Les observations de CLASP sont les premières permettant de mesurer le champ magnétique directement dans les couches élevées de l'atmosphère solaire. Plusieurs publications décrivent les premiers résultats de CLASP (Gordino et al. 2018, Ishikawa et al. 2017, Ishikawa et al. 2017, Schmidt et al. 2017, Giono et al. 2017, Kano et al. 2017, Narukage et al. 2017, Kubo et al. 2016).
- 2) L'hélicité magnétique, qui mesure l'entortillement des lignes de champ magnétique, est une des rares quantités invariantes en MHD. La détermination de ce paramètre n'est devenue possible qu'avec des mesures précises du champ magnétique 3D dans la photosphère et la reconstruction dans la couronne. Son étude prend un essor depuis quelques années, auquel la communauté française fournit des contributions importantes (Figure 5). L'hélicité a ainsi été analysée dans des simulations numériques d'émergence de tubes de flux magnétiques torsadés, depuis la zone de

convection jusqu'à la couronne, simulant la formation de régions actives solaires [Guennou et al. 2017, Pariat et al. 2017, Linan et al. 2018]. Les travaux théoriques et appliqués aux observations [Dalmasse et al. 2013, Dalmasse et al. 2014, Dalmasse et al. 2018] ont pour la première fois permis la représentation 3D du flux de l'hélicité à travers la photosphère, depuis l'intérieur solaire, au sein de la structure magnétique 3D de la couronne solaire: les hélicitigrammes 3D.

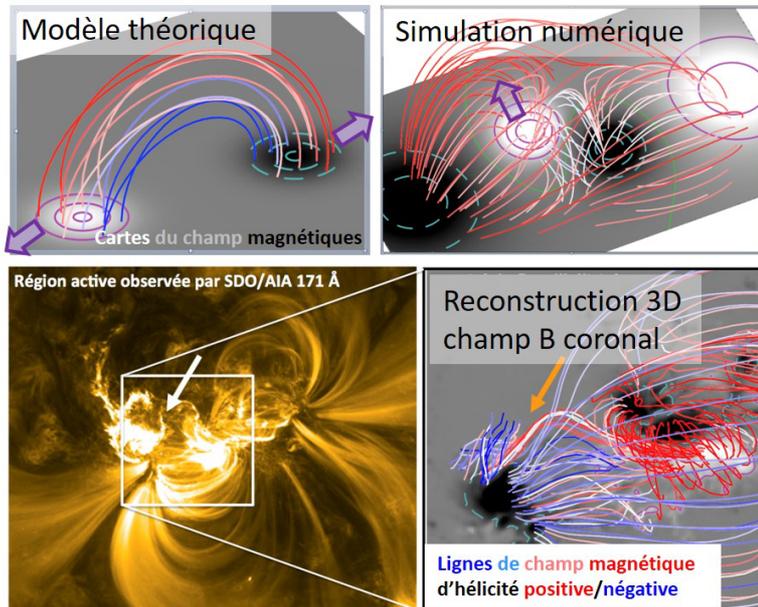


Figure 5. Hélicitigrammes 3D : distribution du flux photosphérique de l'hélicité magnétique dans la couronne solaire.

Couplage entre la couronne et le vent solaire

La source du vent solaire lent est un sujet toujours débattu. Il est en effet difficile de relier le vent observé dans l'espace interplanétaire à des signatures de mouvements du plasma dans la basse couronne. Les mouvements ascendants détectés à l'ouest et à l'est des régions actives par les mesures à bord de la sonde *Hinode* sont des sources potentielles. Leur structure 3D en éventail a été déterminée en combinant les mesures Doppler depuis *Hinode* avec la rotation du soleil (Baker et al. 2017). Une étude de la topologie magnétique coronale a été nécessaire pour déduire le chemin suivi par une partie du plasma pour rejoindre le vent solaire [Mandrini et al. 2014]. La composition du plasma qui est dérivée des observations coronales [Baker et al. 2015] et des mesures in situ, permet de confirmer qu'une partie du vent lent observé à 1 AU provient des régions actives [Culhane et al. 2014].

Le vent solaire est accéléré par un gradient de pression, donc pour le décrire il faut modéliser correctement le chauffage de la couronne. L'effort de recherche porte sur les modèles à "moteur turbulent", dans lesquels le chauffage est le résultat de la dissipation turbulente des ondes générées par les mouvements à la surface solaire. Nous étudions en détail la forme de la dissipation turbulente des ondes emportées par le vent. Nous le faisons avec des niveaux de description différents soit dans la zone d'accélération (Verdini et al. 2018, modèle de turbulence en « couches »), soit entre 0.2 et 1 AU (Montagud-Camps et al. 2018, simulation des équations MHD). Ensuite, nous incorporons le savoir ainsi acquis dans un modèle de vent solaire à moteur turbulent (Grappin et al. 2018) permettant de décrire l'écoulement grande échelle de la surface jusqu'à une distance pouvant varier de 20 à 200 rayons solaires.

Encore plus récemment, nous avons aussi développé un modèle 3-D MHD du vent solaire à partir du code PLUTO et de magnétogrammes WILCOX/MDI/HMI dont le but à court terme sera d'aller jusqu'à 1 AU afin de modéliser la spirale de Parker (Réville & Brun 2017). Nous pouvons adapter les sorties du modèle pour être dans le bon système de coordonnées héliocentrique. Ces développements pourront à terme offrir à la France un modèle MHD du vent solaire du Soleil à la Terre.

Un modèle déployé récemment à l'IRAP calcule des solutions de vent simultanément le long d'un large échantillon de tubes de flux magnétiques traversant toute l'atmosphère solaire (Pinto et Rouillard 2017). Cette stratégie permet d'échantillonner des régions entières de la couronne et de calculer les vitesses du vent solaire plus correctement et plus rapidement que ce qui est possible aujourd'hui avec des modèles globaux multidimensionnels. La méthode numérique est basée sur un code numérique MHD de vent solaire dans un tube de flux 1D incluant les couches chromosphériques et un traitement thermique avancé (Pinto et al. 2009; Grappin et al. 2010).

Couplage entre les plasmas du vent solaire et de la magnétosphère terrestre

Interaction vent solaire-magnétosphère

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. Le transfert d'énergie, de matière et de flux magnétique depuis le vent solaire vers la magnétosphère est favorisé lorsque le champ magnétique interplanétaire est orienté vers le sud. Le processus physique le plus étudié pouvant être à l'origine de ce transfert est la reconnexion magnétique entre les lignes de champ magnétique du vent solaire et celles de la magnétosphère terrestre, principalement au niveau de la région subsolaire de la magnétopause (Li et al. 2016). Ce processus peut entraîner la formation de tubes de flux reconnectés qui sont ensuite convectés par le vent solaire et peuvent être à leur tour le siège de reconnexions secondaires (Roux et al. 2015). L'analyse des données *Cluster* pendant la traversée du choc terrestre a permis de montrer que la structure du front de choc est similaire à celle d'une onde non-linéaire du type « sifflement » (whistler en anglais; Wilson et al. 2017). La mesure tridimensionnelle des fluctuations électromagnétiques avec la mission MMS (Le Contel et al. 2016a, Torbert et al. 2016) a permis de détecter des émissions de sifflement quasi-stationnaires se propageant du côté magnétosphérique vers la région de reconnexion, et s'interrompant au moment où des électrons énergétiques s'échappent le long des lignes de champ magnétique récemment reconnectées à celles du vent solaire. D'autres émissions de sifflement sont aussi détectées du côté de la magnétogaine. Dans les deux cas la source d'énergie libre à l'origine de ces ondes est associée à l'anisotropie de température des électrons (Le Contel et al. 2016b). L'émission peut être aussi associée à l'existence de faisceaux d'électrons issus de la magnétogaine (Wilder et al. 2016). Lorsque le champ magnétique interplanétaire est orienté vers le nord, l'instabilité à grande échelle de Kelvin-Helmholtz peut permettre le transfert de matière (Faganello et al. 2014, Rossi et al. 2015, Stawarz et al. 2016).

En termes de couplage global, l'impact de la présence d'une population d'ions froids d'origine ionosphérique dans la magnétosphère a été très discuté ces dernières années. Comme nous le décrivons ci-dessous (section Activité éruptive ou impulsive dans les plasmas), la présence de cette population entraîne une réduction majeure du taux de reconnexion et donc du couplage global.

Par ailleurs, des modèles PIC et hybrides sont utilisés pour étudier la reconnexion (Markidis et al. 2014) et l'impact d'une perturbation interplanétaire de grande amplitude sur les frontières externes et internes d'une magnétosphère planétaire/terrestre (modélisation PIC 3D et 2D d'ondes de choc non-collisionnelles et des frontières naturelles internes/externes de la magnétosphère (Lembège et al. 2016; Muschietti et al. 2017; Turc et al. 2015)).

Interaction de structures magnétiques transitoires avec la magnétosphère

Par une analyse statistique de 306 ICME et de leurs orages magnétiques induits, Benacquista et al. (2017) montrent la nécessité de considérer chaque événement (gaine plus ICME) dans son ensemble. En effet, l'orage magnétique global est lié à la fois aux contributions de la gaine et de l'ICME et la plupart du temps la magnétosphère est encore perturbée par la gaine lorsque l'ICME l'impacte. La géo-effectivité de la gaine est fortement liée à la présence d'un choc. La géo-effectivité de l'ICME est liée aux deux structures : la compression entre la gaine et l'ICME provoque une augmentation de l'amplitude du champ magnétique pendant la première partie de l'ICME, ce qui pourrait augmenter sa géo-effectivité. Plus la vitesse de propagation de l'ICME est élevée, plus cette augmentation sera forte. Cette analyse démontre que la polarité du nuage magnétique impacte non seulement l'intensité de l'orage magnétique, mais aussi son profil temporel. La géo-effectivité des ICMEs est optimale dans la région des ceintures de radiations $L=2.5-4.5$ quelle que soit l'énergie des électrons. Au contraire, les CIRs sont géo-effectifs pour la région externe des ceintures de radiation, $L>4$.

Un groupe composé des différents domaines d'expertise du PNST et soutenu par le programme (Bocchialini et al. 2018) a étudié les causes de la géoeffectivité des éjections coronales de masse (CME) en suivant toute la chaîne de processus du Soleil à l'ionosphère. Le point de départ de l'analyse fut inhabituel, la liste des "Sudden Storm Commencements" SSC (32 en 2002), pour ensuite remonter à leur possible source solaire. L'étude montre que les événements géoeffectifs sont dus principalement à des nuages magnétiques (MC) (11/12), avec une minorité de CME interplanétaires qui ne présentent pas les caractéristiques des nuages magnétiques (2/6). L'impact sur la magnétosphère se manifeste par sa compression et l'occurrence d'émissions radio terrestres en fonction des paramètres du vent solaire. Les événements les plus géoeffectifs ont des effets notables sur l'ionosphère et la thermosphère.

Les CME ne traversent pas l'espace interplanétaire comme des structures stables. Ruffenach et al. (2015) ont démontré de manière statistique l'érosion des CMEs par le processus de reconnexion magnétique avec le champ magnétique ambiant. Le processus peut avoir lieu à l'avant comme à l'arrière des CMEs, et il est observé sur la majorité des CMEs entre 1995 et 2012. Compte tenu de sa fréquence, ce processus d'érosion a des implications importantes en termes de météorologie de l'espace, en raison de l'ablation d'une partie du flux magnétique initial de la CME, comme mis en avant dans Lavraud et al. (2014).

Si les nuages magnétiques sont reconnus comme les événements solaires les plus géoeffectifs, leur interaction avec la magnétosphère reste mal comprise. A partir des observations de *Cluster* et de modélisations hybrides 3D, Turc et al. (2014, 2015) ont montré que la distribution des champs et plasmas au voisinage de la magnétopause, donc susceptibles d'interagir avec la magnétosphère, dépendait de la configuration magnétique des nuages au niveau du choc d'étrave terrestre. Ces études démontrent que la réponse magnétosphérique peut sensiblement différer des estimations faites dans le milieu interplanétaire, c'est-à-dire avant que la structure n'atteigne la magnétosphère. Ce travail se poursuit avec la simulation d'une onde de choc en amont du nuage magnétique (Turc et al. 2016, 2017).

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 entré depuis le vent solaire diffuse le long des lignes du champ géomagnétique et coexiste avec le plasma ionosphérique. Les couplages entre la magnétosphère et l'ionosphère se font via la convection. Les

études du couplage Ionosphère/Magnétosphère ont donné lieu à de nombreux résultats scientifiques importants ces dernières années grâce notamment à la sonde MMS et à l'exploitation continue des données *Cluster*, *THEMIS*, *DE1*, *Polar*, *CRRES*, *Akebono* ou des sondes *Van Allen* (auparavant *RBSP: Radiation Belt Storm Probes*). De cette période particulièrement féconde sont issus de nombreux articles impliquant la communauté française [Agapitov et al. 2014ab, Agapitov et al. 2015, Aryan et al. 2014, Artemyev et al. 2014abcd,, Artemyev et al. 2015abcd, Artemyev et al. 2016, Breuillard et al. 2014, Breuillard et al. 2015, Li et al. 2014, Mourenas et al. 2014ab, Mourenas et al. 2015, Mourenas et al. 2016, Mozer et al. 2015, Vasko et al. 2017, 2017b] qui sont résumés dans un article de revue [Artemiev et al. 2016].

Parmi les principaux résultats, on notera l'étude des ondes de sifflement lors des sous orages magnétiques capables d'accélérer les électrons vers l'ionosphère (Agapitov et al. 2014, Turner et al. 2017) et produisant des signatures caractéristiques (Breuillard et al. 2014, Taubenschuss et al. (2014, 2016).

Pendant ou hors période de sous-orage, des jets de plasma ("bursty bulk flows") se propagent à travers la queue géomagnétique. Leur origine est attribuée à un processus de reconnexion multiple et localisé ou encore à une instabilité de type "kink/interchange". Localisés en azimut, ces jets se propagent en créant un circuit de courant de petite échelle qui se referme dans l'ionosphère (Nakamura et al. 2017, 2018). De plus, l'empilement des tubes de flux magnétique associés au jet produit un "front de dipolarisation" dont l'épaisseur est de l'ordre du rayon de giration des ions. Des ondes hybrides basses de très forte amplitude sont émises là où le gradient de densité est fort. Près de la région d'émission de ces ondes, des structures cohérentes électromagnétiques relativistes ("electron phase-space holes") ont été détectées pour la première fois par plusieurs satellites (Le Contel et al. 2017, Figure 6). Elles sont associées à des électrons piégés par un champ électrique parallèle bipolaire et se propagent rapidement le long du champ magnétique dans la direction anti-solaire et donc opposée à celle du jet.

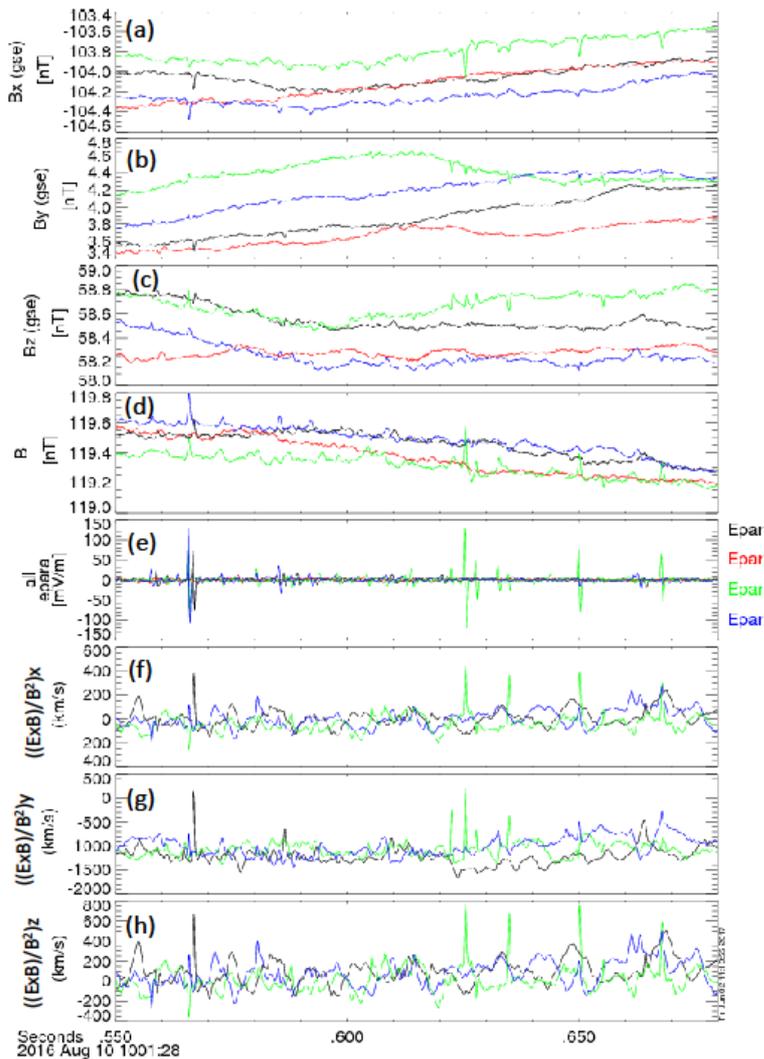


Figure 6. Solitons électromagnétiques détectés par MMS au voisinage d'un front de dipolarisation (Le Contel, et al. 2017): (a–d) composantes et module du champ magnétique obtenus à partir de la fusion des données des magnétomètres basse (FGM) et haute fréquence (SCM), (e) champ électrique parallèle, et (f–h) composantes de la dérive électrique $(E \times B)/B^2$.

L'interaction des ondes solitaires et des whistlers avec des électrons dans les ceintures de radiation, en raison de la proximité des relations de dispersion des ondes, peut produire un phénomène intéressant : le raidissement des whistlers quasi-parallèles.

Alors que les courants alignés vers la Terre sont essentiellement portés par les électrons, Cheng et al. (2016) a montré à partir des fonctions de distribution des ions mesurés par Cluster qu'une partie importante des courants alignés vers la queue est portée par des ions énergétiques ionosphériques. L'arrivée d'ions ionosphériques peut aussi moduler l'intensité des modes de sifflement de type cœur (Nishimura et al. 2015). De même, la formation des aurores diffuses côté jour a pu être reliée à l'arrivée d'ions froids de la magnétogaine (Han et al. 2017). Enfin, les ondes magnétosoniques rapides sont aussi particulièrement étudiées pour analyser leurs effets (accélération et chauffage) principalement sur la population ionique de la magnétosphère interne. L'ensemble de leurs caractéristiques ont pu être précisées (Nemec et al. 2013, 2015a,b ; Hrbakova et al. 2015, Parrot et al. 2016, Walker et al. 2015), notamment leur génération aux harmoniques de la gyrofréquence des protons (Balikhin et al. 2015).

Enfin l'étude statistique des variations de densité dans la région F2 consécutive à l'impact d'une région d'interaction en corotation (CIR) sur la magnétosphère a montré que cette couche diminue dans le secteur après-midi en hiver, dans le secteur midi-minuit aux équinoxes et dans l'ensemble des secteurs en été. Les décroissances sont les plus fortes en hiver et peuvent être maximales deux jours après l'impact, avec une durée de perturbation qui peut aller jusqu'à quatre jours (Grandin et al. 2015). Cette étude a été complétée aux régions aurorales (Grandin et al. 2017). Les observations (Figure 7) ont été interprétées à l'aide du code IPIM

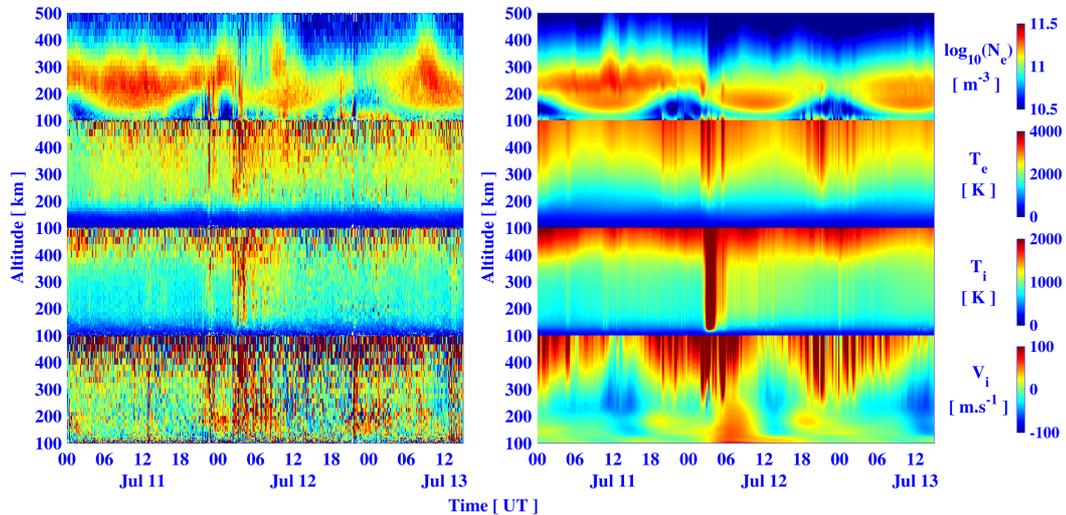


Figure 7 : Densité électronique, températures électronique et ionique et vitesse ionique en fonction de UT et de l'altitude sur la période du 11 au 13 Juillet 2008, avec l'impact de la CIR représentée par la ligne pointillée noire. Panneaux de gauche : Observations faites par le radar EISCAT de Tromsø. Panneaux de droite : Résultats de la simulation TRANSCAR à la position de Tromsø

Pour aborder ces couplages de manière plus globale, à toutes les latitudes, un nouveau modèle ionosphérique, basé sur une approche 16 moments et décrivant le transport interhémisphérique dans la plasmasphère terrestre a été développé (Marchaudon & Blelly 2015). Ce modèle montre que le plasma se structure le long des lignes de champ, notamment en terme de composition, et plus précisément au voisinage du point de stagnation où se développe le "trough". En particulier, les équilibres de forces évoluent à mesure que l'on se rapproche de l'apex avec une contribution des forces d'inertie qui est compensée par la gravité puis les gradients de pression. Le modèle est construit suivant une approche "planète indépendante" qui autorise une adaptation rapide à d'autres environnements planétaires. Actuellement, des extensions ont été réalisées pour Mars, Vénus, Jupiter et bientôt Saturne.

Couplage entre l'ionosphère et la haute atmosphère

Une manifestation particulièrement parlante de l'interaction entre l'atmosphère neutre de la Terre et l'ionosphère est la détection d'ondes d'origine humaine par le satellite ionosphérique DEMETER. Il s'agit d'ondes émises par les émetteurs TBF et EBF [Parrot et al. 2015; Boudjada et al. 2017], par les stations de radio [Parrot et al. 2015], des lignes électriques [Němec et al. 2015; Bezdeková et al. 2015] et par les expériences actives [Frolov et al. 2015, Titova et al. 2015, Vartanyan et al. 2016, Frolov et al. 2016]. Par exemple, une onde émise par un émetteur EBF utilisé pour la communication avec les sous-marins a été enregistrée pour la première fois [Parrot, 2008]. Toutes ces ondes se propagent vers la magnétosphère et elles peuvent être observées au point conjugué magnétique de leur région d'émission. Selon leurs fréquences, elles perturbent l'ionosphère et les particules dans les ceintures de radiation. Il a été constaté que les émissions d'origine humaine peuvent déclencher

d'autres émissions dans la magnétosphère, au travers d'interactions ondes-particules (Parrot et al. 2014; Němec et al. 2017). Ces études concernent plus généralement les phénomènes qui ont lieu dans l'atmosphère terrestre et qui modifient l'ionosphère [De Santis et al. 2016] y compris par exemple l'activité orageuse (Bourriez et al. 2016; Błęcki et al. 2016).

Enfin, une nouvelle méthode d'analyse des données GPS a été développée afin d'extraire des informations sur le milieu couplé atmosphère-ionosphère, s'appuyant sur le code IPIM. La méthode a été testée avec succès sur Mars (radio-occultation).

TARANIS sera la mission phare des études du couplage magnétosphère-ionosphère-atmosphère pour les années à venir. Nous en parlerons plus en détail dans la section Activité éruptive ou impulsive dans les plasmas.

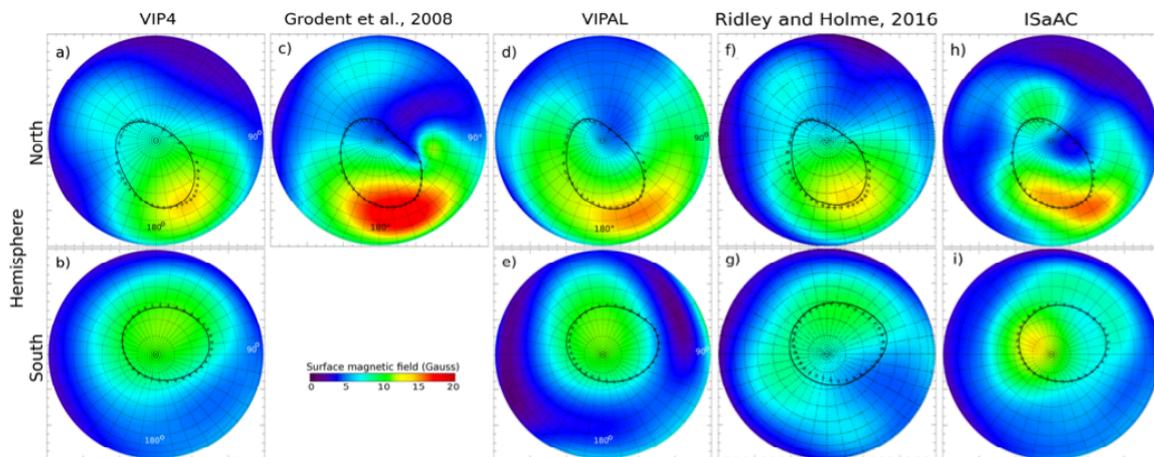


Figure 8. Champ magnétique de surface pour différents modèles de champ magnétique de Jupiter, jusqu'au modèle ISaAC. Les croix indiquent la position observée de l'empreinte aurorale UV d'Io et la ligne noire la position prédite par la modèle. Tiré de (Hess et al. 2017).

Couplage entre les différentes enveloppes de plasmas pour d'autres objets du système solaire

Magnétosphères planétaires

Les planètes du système solaire offrent une vaste gamme d'interactions entre enveloppes de plasma couvrant les couplages entre ionosphère, magnétosphère, vent solaire et lunes le cas échéant. En dehors de l'étude des corps individuels, qui relève largement du PNP, la variété des situations, par la présence ou non d'un champ magnétique ou d'une ionosphère, et par la géométrie du champ magnétique, est une source riche d'informations qui permet d'apprécier et de mieux comprendre les particularités du système Soleil-Terre.

L'arrivée de Juno à Jupiter a été précédée par la mise au point d'un nouveau modèle de champ magnétique jovien utilisant la position de l'empreinte magnétique aurorale UV de Io, Ganymède et Europe comme contraintes aux tubes de flux interceptant les satellites (voir Figure 8). Ce nouveau modèle de champ, baptisé ISaC (*In Situ and Auroral Constraints*) et mettant à jour le modèle VIPAL, ajuste par ailleurs très bien les premières mesures magnétiques de Juno en orbite (Hess et al. 2017). La comparaison au long cours des observations radio distantes des sondes d'exploration *Juno*, *Cassini* et *Voyager* avec des simulations des émissions radio induites par l'interaction entre Jupiter et ses satellites galiléens via le code SERPE a conduit à l'identification de toutes les émissions Io-contrôlées et à la détection, puis la caractérisation, d'émissions induites par Ganymède et Europe (Louis et al. 2017a, b). Ces résultats ouvrent un nouveau champ d'étude radio à long terme des interactions

planète-satellite. L'étude statistique de 26 ans d'observations du réseau décimétrique de Nançay, qui a fêté 40 ans d'observations de Jupiter en 2017 (Lamy et al. 2017), a abouti à la construction d'un catalogue des composantes hectométriques et décimétriques du spectre radio auroral jovien. Ce catalogue a permis de caractériser leurs propriétés moyennes – spectre, occurrence, variabilité – (Marques et al. 2016), puis d'identifier pour la première fois depuis le sol des émissions radio induites par Ganymède. Leur intensité est en accord avec les prédictions d'émissions exoplanétaires (Zarka et al. 2017). L'étude des observations radio de Jupiter avec *Cassini*, *Galileo* et le réseau décimétrique de Nançay avait au préalable montré le rôle des chocs interplanétaires dans l'activation de sources radio du côté soir de la magnétosphère. On mesure un mouvement de sous-rotation par rapport à la période de rotation rigide (Hess et al. 2014).

L'analyse d'observations du télescope spatial *Hubble* (HST) de Saturne coordonnées avec le Grand Finale de la mission *Cassini* lors du passage de la sonde dans les régions aurorales a permis de caractériser les différentes composantes aurorales et leur puissance, d'identifier des orages produits par des compressions de la magnétosphère par le vent solaire et d'établir les propriétés moyennes des aurores – intensité, position – qui forment un cadre de référence pour l'étude des mesures *in situ* de *Cassini* (Lamy et al. 2018b).

Plusieurs campagnes d'observation d'Uranus avec le HST ont été menées entre 2011 et 2017 lors de passages d'ondes de choc interplanétaires, alors que la planète se trouvait dans sa configuration post-équinoxiale. Les moments de passage des chocs ont été prédits à priori depuis la Terre à l'aide de plusieurs modèles MHD. Ces observations ont augmenté significativement le nombre de détections des aurores d'Uranus. Elles ont permis d'en extraire les propriétés moyennes et d'explorer le rôle du vent solaire dans leur génération (Lamy et al. 2017, Barthélémy et al. 2014).

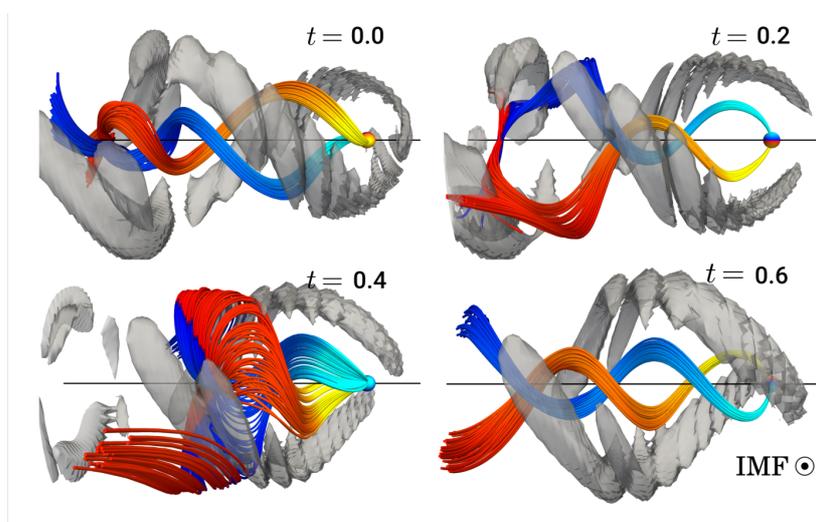


Figure 9. Simulation MHD d'une magnétosphère en rotation rapide, inspirée du cas d'Uranus au solstice. L'axe de rotation aligné est sur la direction du vent solaire qui vient de la droite et l'axe magnétique de la planète est orienté perpendiculairement à la direction du vent avec le champ magnétique interplanétaire. La simulation montre une évolution complexe de la structure en hélice (de nature Alfvénique) des lignes magnétiques connectées aux pôles magnétiques de la planète ainsi que la structure des zones de reconnexion magnétique (délimitées par les surfaces grises). Les temps sont en unités de la période de rotation (Griton et al. 2018).

Enfin, la simulation MHD des interactions magnétosphère/vent solaire a permis d'étudier la structure de différents types de magnétosphères. Deux exemples sont l'interaction avec le vent solaire et la propagation d'ondes MHD à Mercure, en soutien à la mission Bepi-Colombo (Varela et al. 2016a, b, c, Pantellini et al. 2015, Pantellini & Griton 2016) et la dynamique de la queue de la magnétosphère d'Uranus à différentes saisons (Griton et al. 2018). Une illustration est fournie à la

Figure 9.

L'environnement plasma d'une comète - le cas de la comète 67P :

Les observations de la sonde Rosetta en orbite autour de la comète 67P/Gerasimenko lors de son passage au périhélie ont conduit à l'étude détaillée de son environnement plasma et de l'évolution de sa magnétosphère induite et ses différentes régions et frontières en fonction de la distance de la comète au soleil. Une étude statistique des mesures particules *in situ* a ainsi mené à la caractérisation de son environnement ionique variable (Henri et al. 2017). Une autre étude a caractérisé la présence de deux populations électroniques cométaires : une première, avec une énergie moyenne de l'ordre de 5-10 eV, associée directement aux électrons issus de l'ionisation de l'atmosphère cométaire en expansion et une seconde, avec une énergie de l'ordre d'une fraction d'eV, issue de la thermalisation de ces électrons par collisions sur les molécules neutres de l'atmosphère cométaire (Gilet et al, 2017). Les observations des spectro-imageurs ont par ailleurs révélé une source inattendue d'émission UV au voisinage du noyau cométaire expliquée par la dissociation de la vapeur d'eau par l'impact d'électrons énergétiques (Chaufray et al. 2017).

Atmosphères planétaires

Les recherches sur les relations atmosphère/surface de Mars, Vénus, Mercure ou la Terre s'appuient sur des mesures sol et spatiales (MAVEN, Mars Express, Mars Global Surveyor, Venus Express) qui sont le support de travaux théoriques et de modélisation. Ces activités englobent l'analyse des émissions des hautes atmosphères planétaires induites par l'interaction du plasma solaire avec l'ionosphère et l'exosphère, l'étude de la chimie ionosphérique et de ses conséquences pour l'échappement atmosphérique et de la formation des exosphères planétaires.

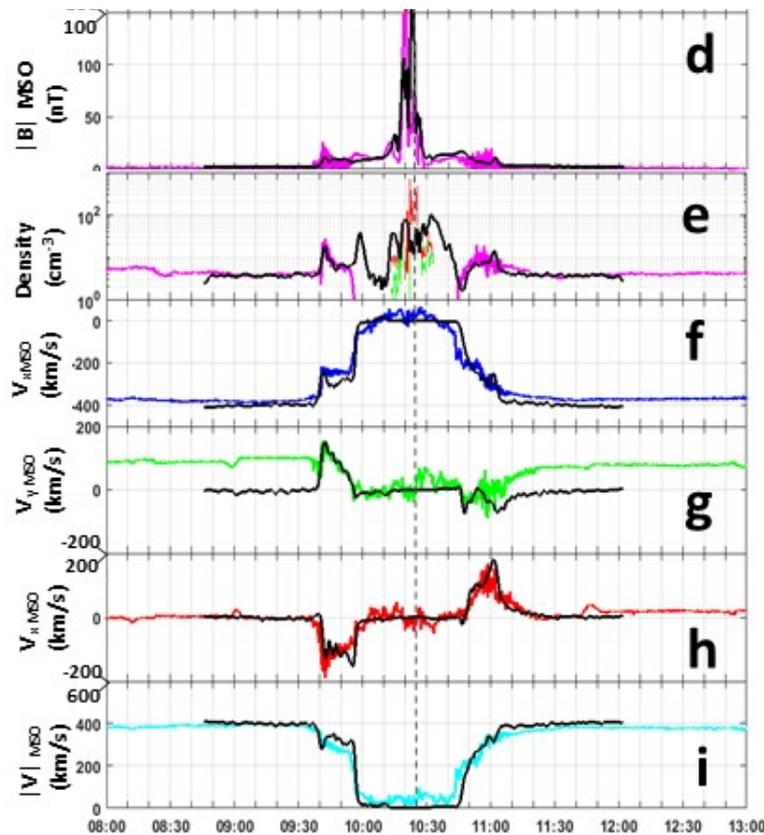


Figure 10 : Comparaison entre une simulation LatHyS et les mesures de la sonde MAVEN (Modolo et al. 2018).

Mars a été l'objet d'un intérêt accru depuis l'insertion de la mission MAVEN fin 2014, dédiée à l'étude de l'érosion de l'atmosphère martienne par son interaction avec le Soleil. Ses mesures in situ ont permis d'étudier des dépressions d'électrons suprathermiques dans l'ionosphère nocturne (Steckiewicz et al. 2015, 2017), la modélisation 3D de l'ionosphère (Chaufray et al. 2014), l'exosphère d'hydrogène (composante importante de l'échappement) et ses variations saisonnières (Chaufray et al. 2015a, 2016, Leblanc et al. 2015, 2017a, Romanelli et al. 2016), les précipitations d'ions énergétiques dans la haute atmosphère (Leblanc et al. 2015), la couronne d'oxygène thermique et suprathermique (Chaufray et al. 2015b, 2016, Leblanc et al. 2017). Dans le cas de Mars, les mesures ont été interprétées par la modélisation des couplages entre les différents plasmas autour de la planète (Modolo et al. 2018, Romanelli et al. 2018), utilisant un ensemble de modèles numériques (*Figure 10*). Les modèles ont récemment été adaptés à d'autres objets du système solaire comme Mercure, Ganymède ou Europe (Leclercq et al. 2016, Leblanc et al. 2017b, Oza et al. 2018).

Une analyse comparée des données UV de *Mars Express* et *Venus Express* s'est par ailleurs intéressée aux évolutions temporelles de leurs exosphères d'oxygène et d'hydrogène (Chaufray et al. 2015b). La détection d'aurores localisées sur Mars par MAVEN a également fait suite à un travail de prédiction d'émissions collisionnelles de CO₂ (Lilensten et al. 2016).

La formation et la dynamique d'une anomalie magnétique lunaire en interaction avec le vent solaire a également été modélisée grâce au code IPI3D, en soutien aux missions *Kaguya* et *Lunar Prospector* (Deca et al. 2015, 2016).

L'exploitation des données ondes locales de la sonde *Cassini* a permis d'étudier les résonances Schumann sur Titan et le mécanisme atypique de leur génération due à l'interaction de l'atmosphère de Titan avec la magnétosphère de Saturne (Béghin 2015).

Les poussières dans le système solaire

La découverte et l'étude de nano-particules de poussière dans le milieu interplanétaire avec les sondes STEREO et *Cassini* a ouvert 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 (Schippers et al. 2014, 2015). Des travaux théoriques sur les observations radio spatiales de nano poussières par *Cassini* se sont poursuivies (Meyer-Vernet et al. 2017).

Les confins de l'Héliosphère: couplage Soleil, milieu interplanétaire, milieu interstellaire

L'étude du milieu interstellaire se poursuit au moyen de l'analyse des données collectées par les instruments *Voyager-UVS* (spectromètre UV lointain, 1977-2013+), SWAN-SOHO (1995-2018+) et par comparaison des résultats de SWAN avec ceux de la sonde américaine IBEX (2009-2013). L'instrument SWAN de la mission SOHO a montré que le fond interplanétaire est fortement affecté par les variations de la pression de radiation, mais aussi par les variations spatiales et temporelles des flux ionisants émis par le Soleil (Koutroumpa et al. 2017). A partir d'une carte du fond UV interplanétaire, il est possible de déduire la distribution spatiale du flux du vent solaire. Une étude portant sur une longue période de temps permet de comprendre la variation temporelle de la distribution de flux de masse liée au cycle de 11 ans. Pour interpréter les émissions X dans le système solaire et le milieu interstellaire, il faut calculer les émissions liées aux échanges de charge (CX) entre les ions lourds du vent solaire et les neutres héliosphériques (Uprey et al. 2016) afin de les soustraire correctement aux observations X. Le calcul est réalisé à partir du modèle des neutres héliosphériques développé au LATMOS, avec des proxys empiriques pour les variations du vent solaire. Cette activité est développée en soutien à l'analyse des données DXL, XMM-NEWTON, CHANDRA, HALOSAT ou ATHENA.

Perspectives :

L'étude à distance du couplage entre la couronne solaire et le milieu interplanétaire, que ce soit par des observations de télédétection ou par des mesures in situ à 1 UA, a apporté dans les décennies précédentes une riche moisson de renseignements. Nous avons compris des traits importants sur l'origine du vent solaire, sur la déstabilisation dans la couronne et la propagation interplanétaire des structures magnétiques et sur l'origine des jets de particules de haute énergie. L'interprétation des mesures in situ est néanmoins compliquée par les processus de propagation interplanétaire. Mesurer le vent solaire plus près de sa source est l'un des principaux objectifs des missions *Parker Solar Probe* (PSP) et *Solar Orbiter* (SolO) qui apportent à la physique de l'héliosphère des diagnostics observationnels inédits. Les sondes *Helios* ont exploré l'héliosphère jusqu'à une approche de 0,3 UA au Soleil dans les années 1977-1985, mais sans accompagnement d'observations de spectrographie et imagerie du plasma de la couronne et avec un soutien sol plus faible. La complémentarité des missions PSP et SolO est un autre atout qui structurera les recherches d'une grande partie de la communauté PNST dans la décennie à venir.

Couplage entre les plasmas du vent solaire et de la magnétosphère terrestre

La sonde ESA SMILE (lancement 2021) devrait faire de l'imagerie UV et X de la magnétosphère terrestre et ainsi faire avancer la compréhension des couplages entre le vent solaire et la magnétosphère de la Terre simultanément dans les différentes régions magnétosphériques (magnétopause, cornets, etc.). L'étude comparée de l'interaction vent solaire / magnétosphère, en plein essor, va s'appuyer sur les missions planétaires comme *BepiColombo* et JUICE et le développement des outils de simulations numériques.

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

La communauté PNST est fortement impliquée sur le satellite TARANIS (CNES), dont le lancement est prévu pour 2020 et qui a pour objectif l'étude du couplage magnétosphère-ionosphère-atmosphère via des processus transitoires (*Transient Luminous Effects* (TGEs), *Terrestrial Gamma ray Flashes* (TGFs)). Ces observations fourniront des données sans précédent pour mieux comprendre le rôle des électrons précipités dans le couplage entre la magnétosphère et atmosphère.

Couplage entre l'ionosphère et la haute atmosphère

Le lancement, puis l'opération de la mission TARANIS seront pour la communauté PNST l'élément clef des recherches sur le couplage ionosphère-haute atmosphère. Ce domaine se prête aussi à explorer l'utilité des petites plateformes. Le projet CIRCUS, Cubsat de 3U, en cours de réalisation au LESIA en collaboration avec le LPC2E, l'IMCCE et Telecom Paris, a pour objectif la cartographie in-situ à haute résolution du plasma ionosphérique par spectroscopie du bruit thermique. Le futur système EISCAT 3D (futur d'EISCAT) devrait permettre de sonder l'ionosphère polaire 24h/24h.

Transport d'énergie multi-échelles et turbulence

Contexte

Les processus transitoires dans les plasmas héliosphériques créent de la turbulence qui est à l'origine des processus de chauffage et d'accélération de particules, et qui affecte la propagation des perturbations d'origine solaire. Décrire la turbulence et son spectre, comprendre comment l'énergie est transférée des grandes échelles spatiales, correspondant aux structures macroscopiques que nous voyons en imagerie comme les éjections de masse, vers les petites échelles où elle est finalement dissipée, comprendre quelles propriétés du plasma déterminent les échelles spatiales, est fondamental pour les plasmas héliosphériques comme pour les plasmas astrophysiques en général. C'est dans l'héliosphère que les mesures in situ nous fournissent des contraintes observationnelles fortes. Le couplage entre la turbulence et les ondes électromagnétiques crée aussi des signatures originales observables à distance en ondes radio.

La turbulence et de la dissipation d'énergie dans les plasmas héliosphériques restent une thématique très forte de la communauté PNST. Sur la période 2014-2019 ces activités ont couvert les aspects théoriques (analytiques), numériques et observationnels. Ces travaux étaient souvent accompagnés (ou précédés) de gros efforts de préparation d'exploitation des données des missions spatiales en cours d'exploitation ou en préparation (par exemple, développement de logiciels d'étalonnage des instruments, livraison et archivage de données). On peut citer, par exemple, le travail visant à fusionner les données des deux magnétomètres DC et AC des missions MMS (Fischer et al. 2016) ou de *Solar Orbiter* et *Parker Solar Probe* (Bale et al. 2016). La mission multisatellites MMS de la NASA permet d'obtenir des mesures du plasma avec des résolutions temporelles inégalées (150 ms pour les ions et 30 ms pour les électrons – à comparer à l'échelle de giration des protons qui est typiquement 1s). L'exploitation des données de cette mission sur la problématique de turbulence à petite échelle apporte déjà des résultats très originaux.

La suite logique est une mission spatiale qui fournisse des mesures détaillées aux petites échelles spatiales, sub-ioniques, dans les différents plasmas turbulents accessibles, à savoir la magnétosphère, le vent solaire proche de la Terre, l'environnement des ondes de choc. L'observation aux échelles sub-ioniques devrait permettre d'étudier la réponse des différentes espèces de particules, dans différents régimes de turbulence. Pendant la période 2014-2017 les équipes scientifiques et techniques se sont fortement investies dans la définition et la Phase A de la mission THOR, afin de préparer le développement d'une nouvelle génération d'instrumentation spatiale. Cette mission était l'un des trois candidats finalistes de l'AO M4 de l'ESA, mais n'a pas été retenue par le SPC en mars 2018. Ses objectifs scientifiques restent néanmoins d'actualité..

Bilan 2014-2019

Très grandes échelles (dites MHD)

Anisotropie spatiale de la turbulence :

Les travaux menés visent à mieux comprendre deux propriétés importantes de la turbulence, à savoir son anisotropie spatiale et sa compressibilité, et le rôle de cette dernière dans les processus du chauffage turbulent dans le vent solaire. Les travaux sur l'anisotropie visaient notamment à étudier l'effet d'expansion du vent en plus de l'effet du champ magnétique, qui est plus étudié. Ces travaux

utilisaient l'*expanding box model* (EBM) qui permet de suivre l'évolution 3D du plasma emporté par un écoulement radial. Ce modèle a permis de reproduire des observations in-situ de l'évolution (avec l'échelle) des structures turbulentes et de leur anisotropie dans le repère du champ magnétique local, et d'expliquer les variations de l'anisotropie par l'effet de l'expansion du vent (Verdini & Grappin, ApJ, 2015). Dans le repère absolu lié au soleil, ces travaux ont permis de découvrir la *vraie* structure du modèle Slab (symétrie radiale; Verdini & Grappin). Par ailleurs il a été possible de reproduire les relations observées entre les lois d'échelle de l'excès de l'énergie magnétique et l'énergie turbulente totale (cinétique+magnétique). Elles ont été expliquées par l'équilibre entre relaxation linéaire Alfvén et effet dynamo (Grappin et al. 2016). Enfin, une première mise en évidence dans le vent solaire des trois pentes prédites par Boldyrev (2005) dans les trois directions du repère local a été obtenue (Verdini et al. 2016). L'application de ces travaux au problème du chauffage turbulent du vent solaire a permis de reproduire pour la première fois dans une simulation numérique un profil de température des protons en $1/R$ (Montagud Camps et al. 2018).

Rôle de la compressibilité :

Un autre aspect important de la turbulence qui a été fortement étudié dans les dernières années est le rôle des fluctuations de densité dans le chauffage turbulent du vent solaire. Les travaux théoriques (analytiques) ont permis de dériver les lois exactes de la turbulence, similaires à la fameuse loi de $4/3$ de Kolmogorov dérivée dans le cadre de l'hydrodynamique incompressible (HD), dans le cadre des modèles de la MHD compressible (Banerjee & Galtier 2013 ; Andrés & Sahaoui 2017) et de la MHD-Hall compressible (Andrés et al. 2018) avec l'hypothèse d'un plasma isotherme (les lois exactes du modèle bi-fluide incompressible ont été également obtenues: Andrés et al. 2016). Ces nouvelles lois exactes permettent de réaliser des études bien plus complètes de la turbulence dans les plasmas compressibles, comme ceux des magnétogaines terrestre et planétaires, où les fluctuations de densité sont très importantes ($dn/n \sim 50-100\%$; Hadid et al. 2015, Huang et al. 2017]. Une première application du modèle de la MHD compressible dans les vents solaires rapide et lent a permis, entre autres, de résoudre une controverse vieille de dix ans sur le rôle des fluctuations de densité dans l'amplification du taux de cascade de la turbulence (Hadid et al. 2017). Son application aux données des missions spatiales Cluster et THEMIS dans la magnétogaine terrestre a conduit à la première estimation du taux de dissipation de l'énergie de la turbulence dans cette région dont la valeur est au moins deux ordres de grandeur plus élevée que celle estimée dans le vent solaire (Hadid et al. 2018; *Figure 11*, gauche). Une nouvelle loi empirique liant le taux de cascade d'énergie au nombre de Mach turbulent a été obtenue (*Figure 11*, droite). Si l'universalité de cette loi est confirmée, elle pourrait avoir des applications dans d'autres milieux astrophysiques moins accessibles aux mesures in-situ. Cette étude a fait l'objet de plusieurs communiqués de presse (ESA, INSU, Ecole Polytechnique).

Des travaux numériques ont été également menés pour tester les différentes lois exactes dans des simulations de turbulence compressible (Andrés et al. 2018) et pour étudier les contributions des différents modes propres de la MHD à la cascade turbulente en fonction des paramètres physiques du plasma (Andrés et al. 2017). Par ailleurs, de nouvelles formulations de ces lois exactes (sur l'énergie, les hélicités cinétique et magnétique) en turbulence HD et MHD-Hall ont été obtenues (Banerjee & Galtier 2016, 2017). Ces formulations sont valables dans le cas général (sans hypothèse d'isotropie statistique) et n'utilisent que des fonctions de structure. En particulier, la loi pour l'hélicité magnétique offre la possibilité de mesurer son flux et donc de démontrer la présence d'une cascade inverse, des petites vers les grandes échelles. D'autres travaux ont porté sur des aspects encore plus fondamentaux de la turbulence, à savoir la transition d'un régime de turbulence faible vers celui d'une turbulence forte, la coexistence des deux régimes ou l'apparition de structures intermittentes dans un régime de turbulence faible (Meyrand et al. 2015, 2016). L'universalité de cette problématique de physique des plasmas est illustrée par le fait que le formalisme de turbulence d'ondes (ou turbulence faible) largement développé pour l'étude des plasmas spatiaux a été appliqué pour la première fois à la turbulence d'ondes gravitationnelles (Galtier & Nazarenko, PRL, 2017). Des lois d'échelles de cascade (directe ou inverse) de ces ondes ont été obtenues.

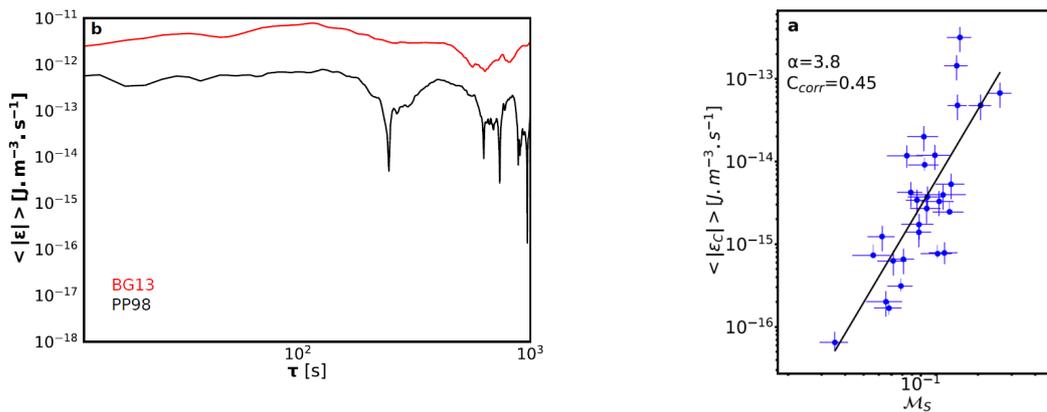


Figure 11 : Gauche : taux de cascade de l'énergie de la turbulence (trait continu) comparé à sa valeur de référence dans le vent solaire (trait pointillé). L'estimation est obtenue en utilisant le modèle de la MHD incompressible de Politano & Pouquet, 1998 (noir) et le modèle compressible de Banerjee & Galtier, 2013 (rouge) sur les données des sondes Cluster et THEMIS dans la magnétogaine terrestre. Droite : le même taux de cascade représenté en fonction du nombre de Mach turbulent.

Sur le plan observationnel, des nouvelles études statistiques basées sur plusieurs années de données de la mission *Cluster* dans la magnétogaine terrestre ont révélé de nouvelles propriétés de la turbulence à grande échelle dans cette région clef de l'environnement plasma de la terre. Cette étude a mis en évidence l'effet de l'onde de choc qui "détruit" les corrélations pré-existantes dans le vent solaire, ce qui mène à la suppression de la zone inertielle et de son spectre en $k^{-5/3}$ (Huang et al. 2017). Néanmoins, de nouvelles corrélations entre les fluctuations apparaissent loin du choc vers les flancs de la magnétosphère où on observe une transition vers une turbulence à la Kolmogorov.

Petites échelles (cinétiques)

L'étude des petites échelles de la turbulence dans le vent solaire ou la magnétosphère terrestre est un thème relativement récent. Sur les quatre dernières années plusieurs avancées ont été réalisées dans la compréhension de la dynamique à petite échelle, en combinant des simulations numériques et observations in-situ. A cause de la difficulté de mesurer ces petites échelles dans le vent solaire, due à leurs faibles amplitudes (voir p. ex. Sahraoui et al. 2009), la magnétogaine terrestre constitue une alternative intéressante pour étudier ce phénomène. En effet, dans cette région les fluctuations électriques et magnétiques peuvent être mesurées par les instruments actuels avec un bon rapport signal/bruit. Par ailleurs, la mission MMS explore déjà cette région et fournit des données sur les fonctions de distribution des particules du plasma avec des résolutions temporelles inégalées à ce jour.

Sur le plan des modélisations, une description plus complète des échelles sub-ioniques requiert l'utilisation de théories ou de codes cinétiques (PIC, Vlasov, hybride) ou le code Landau-fluide (Passot & Sulem 2007, Sulem & Passot 2015). Ce dernier a l'avantage d'allier la souplesse des codes fluides (temps de calcul raisonnables) et l'inclusion des effets cinétiques importants pour décrire les petites échelles, à savoir l'effet Landau et les effets à rayon de Larmor fini (FLRs: Finite Larmor Radius effects).

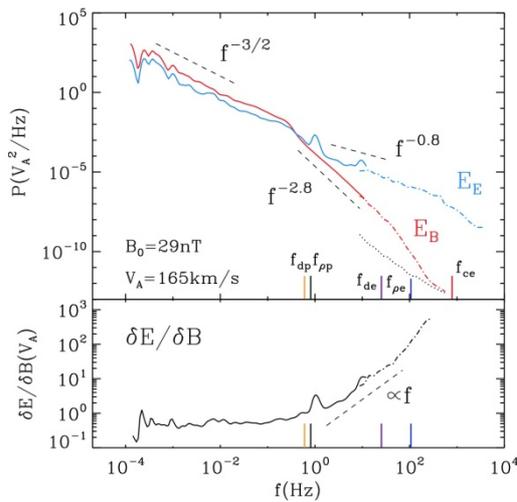


Figure 12: Haut : spectres turbulents des champs E (bleu) et B (rouge) mesurés dans la magnétogaine terrestre par Cluster. Bas : rapport E/B en fonction de la fréquence mesurée; au-delà de l'échelle ionique le rapport augmente linéairement en accord avec les prédictions théoriques

Turbulence aux échelles ioniques

Dans le vent solaire, la cascade des fluctuations magnétiques de type Kolmogorov en $k^{-5/3}$ observée aux grandes échelles s'arrête près des échelles ioniques (~ 100 km), où le spectre change son allure et devient plus pentu (Figure 12). Un scénario basé sur la présence de structures cohérentes énergétiques de type vortex d'Alfvén et de couches de courant a été proposé pour rendre compte de ces observations (Lion et al. 2016). Dans le vent lent, des vortex d'Alfvén, mais aussi des solitons magnétosoniques, ont été également observés (Perrone et al. 2016).

Quand le plasma est instable, plusieurs signatures d'ondes quasi-monochromatiques sont observées près de l'échelle ionique. La nature des ondes (par exemple mode d'Alfvén cyclotron, mode miroir) dépend du type d'instabilité et donc des conditions du plasma. Ces instabilités et les ondes qu'elles génèrent jouent un rôle dans l'isotropisation du plasma. L'imbrication entre les instabilités du plasma, les ondes qu'elles génèrent et les structures cohérentes reste encore mal comprise. Les rôles de chacune de ces composantes dans la variabilité observée des pentes spectrales aux échelles ioniques ainsi que dans la cascade aux plus petites échelles ont été explorés, mais font encore l'objet de débats (Passot et al. 2014, Breuillard et al. 2016, Lion et al. 2016).

Turbulence aux échelles sub-ioniques

Aux fréquences plus grandes que la fréquence de giration des ions (~ 1 Hz), des études statistiques basées sur les données de l'expérience STAFF SC & SA ($\sim [1, 400]$ Hz) de la mission Cluster ont montré qu'aux échelles ioniques et sub-ioniques la turbulence est de type Alfvénique (KAW : Kinetic Alfvén Waves) et qu'elle est fortement anisotrope ($k_{\text{perp}} \gg k_{\text{para}}$), en accord avec les résultats déjà publiés (Sahraoui et al. 2009, 2010). Mais aux plus petites échelles les vecteurs d'onde tendent à s'isotropiser (Lacombe et al. 2017). Près de l'échelle caractéristique des électrons, des émissions sporadiques d'ondes whistler quasi-parallèle ($k_{\text{para}} \gg k_{\text{perp}}$) se superposant à la cascade turbulente ont été observées. Ces whistlers ont une plus longue durée de vie que celles étudiées dans Lacombe et al. (2014). L'influence de ces whistlers sur la forme de la fonction de distribution des électrons a été étudiée. Ainsi un élargissement du faisceau d'électrons dans la direction antisolaire alignée avec le champ magnétique (strahl) a été mis en évidence en présence d'ondes whistlers, ce qui montre le rôle de ces dernières dans la diffusion du strahl vers le halo des électrons (Kajdic et al. 2016). L'augmentation de cette diffusion en fonction de la distance radiale a été observée auparavant par

Maksimovic et al. (2005) et Stverak et al. (2009).

Les observations in-situ dans le vent solaire et la magnétogaine terrestre ont montré une grande variabilité des pentes spectrales du champ magnétique aux échelles sub-ioniques (Sahraoui et al. 2013, Huang et al. 2014). Pour expliquer cette variabilité, d'importants travaux théoriques et numériques ont été menés, basés notamment sur le modèle Landau-fluide. Ainsi, il a été montré que la dispersion des pentes spectrales peut être expliquée par la variation du paramètre de nonlinéarité (rapport dépendant des amplitudes des fluctuations et de l'anisotropie $k_{\text{perp}}/k_{\text{para}}$ de la turbulence) (Passot & Sulem 2015, Sulem et al. 2016]. Ces travaux ont également montré l'importance de l'effet Landau dans la dissipation d'une partie des fluctuations turbulentes et dans l'homogénéisation de la température dans la direction parallèle au champ magnétique (Sulem et al. 2016). Enfin, ils ont permis de quantifier l'importance des différents modes propres (modes d'Alfvén cinétiques ou magnéto-sonores) dans la cascade turbulente aux échelles sub-ioniques en présence d'effet Landau et des effets à rayon de Larmor fini (Kobayashi et al. 2017).

Turbulence aux échelles électroniques

Les premiers spectres turbulents électriques (E) et magnétiques (B) couvrant les échelles de la MHD jusqu'aux échelles sub-électroniques ont été observés dans la magnétogaine (*Figure 12*). Ils montrent qu'au delà des échelles MHD le spectre de B devient plus pentu, à l'opposé de celui de E qui se redresse légèrement en passant d'une pente en $-5/3$ à une proche de $-1/3$, en accord avec la loi d'Ohm généralisée et les résultats de simulations numériques de turbulence 3D utilisant des codes Landau-fluide (Passot et al. 2014) et hybrides (en 2D et 3D; Matteini et al. 2017).

L'exploitation des données à haute résolution de la mission MMS dans la magnétogaine terrestre a confirmé l'idée selon laquelle la cascade turbulente vers les petites échelles génère une foison de structures cohérentes de différentes natures. Les données MMS ont rendu possible l'étude fine de la topologie et de la dynamique de ces structures. Un nouveau type de structure cohérente appelé *electron vortex magnetic hole* a été mis en évidence pour la première fois, ainsi que son rôle dans le chauffage local et l'accélération des électrons (Huang et al. JGR 2017). Ce travail fait suite à l'identification en détail (Huang et al. GRL, 2016) des structures de type îlot magnétique à l'échelle ionique montrant une forte dynamique des électrons à l'intérieur de ces structures (faisceaux parallèles et bidirectionnels d'électrons énergétiques), ainsi que la présence d'ondes intenses (ondes hybrides basses, bruit large-bande électrostatique et solitons), ce qui indique que les électrons peuvent être accélérés et chauffés dans ces structures. Une autre étude a permis de démontrer la corrélation forte entre le chauffage local des électrons dans la magnétogaine et les forts courants électriques associés à des couches de courant de très petites échelles, où la reconnexion magnétique est susceptible de se produire (Chasapis et al. 2017). Enfin, l'étude des spectres turbulents des champs électriques et magnétiques dans la magnétogaine, à l'instar de ce qui a été fait dans le vent solaire, a montré l'importance des fluctuations électriques aux échelles électroniques et le possible changement de la nature de turbulence, d'électromagnétique vers électrostatique, à l'approche de ces échelles-là (Breuillard et al. 2018).

Turbulence de Langmuir et émissions radio liées à la propagation de faisceaux dans le milieu interplanétaire

Les recherches sur la nature de la turbulence (par exemple, électrostatique (ES) vs électromagnétique (EM)) aux très petites échelles trouvent leur prolongement dans l'étude des processus à petite échelle à l'origine des émissions radio liées aux éruptions solaires et aux chocs interplanétaires. Les mécanismes d'émission radio des faisceaux d'électrons sont un diagnostic important à distance des processus d'accélération au Soleil et de la propagation coronale et interplanétaire des électrons. Une meilleure compréhension des mécanismes qui transfèrent de l'énergie des électrons vers les ondes de plasma, puis vers les ondes électromagnétiques, améliorera nos possibilités de diagnostic à distance – possibilités qui, avec l'opération de grands radiotélescopes

en ondes métriques s'appliquent aussi à d'autres atmosphères stellaires. La combinaison de mesures à distance et in situ nous procure une occasion unique d'étudier ces processus dans les plasmas héliosphériques. Sur la période 2014-2019, des travaux théoriques et numériques (codes Vlasov et PIC) et des travaux observationnels (analyse des données STEREO et WIND) ont été menés.

En particulier, il a été montré comment la propagation de multiples faisceaux d'électrons de vitesses différentes peut conduire à l'inhibition des ondes EM. Ce travail a également permis de bien mettre en évidence le caractère paramétrique des mécanismes d'émission en comparant avec des simulations Vlasov (Briand et al. 2014). Ensuite, la question délicate du développement des ondes de Langmuir en milieu inhomogène a été abordée via des simulations Vlasov (Sgattoni et al. 2017). Cette analyse a montré comment la présence de trous de densité du plasma peut faciliter la formation d'ondes de Langmuir, même dans des conditions par ailleurs peu favorables (densité de faisceau faible par exemple). Le second résultat de cette analyse est la mise en évidence de l'accélération des électrons résultant de l'interaction ondes-plasma. Enfin, des simulations HPC en PIC-2D3V ont été réalisées pour étudier (1) l'efficacité du processus de conversion de l'énergie cinétique du faisceau électronique en énergie de l'onde EM, et (2) la directivité des ondes EM. Ces simulations sont quasi-unicas car elles incluent les échelles ES et EM avec une résolution spatiale inégalée (Sgattoni et al. 2017). A noter que ces simulations ont également servi de base pour une expérience laser au LULI-2000 de Saclay.

Signalons enfin la mise à disposition des formes d'onde Langmuir mesurées par STEREO, pour la période 2007-2018, au CDPP. Plus de 11.000 formes d'onde sont ainsi disponibles, dans un repère du champ magnétique interplanétaire, rendant les données exploitables plus facilement (Briand et al. 2016).

L'étude et la modélisation de l'interaction faisceau-plasmas et de la production d'ondes de Langmuir dans le vent solaire est devenue un domaine de recherche particulièrement actif et productif (Krafft et al. 2015, Voshchepynets et al. 2015). En particulier, il a été montré l'influence des inhomogénéités de densité sur les phénomènes de décomposition résonante d'ondes de Langmuir (Krafft et al. 2015), sur les processus de diffusion en vitesse des électrons (Volokitin & Krafft 2016] et sur les mécanismes d'accélération des particules (Krafft & Volokitin 2016, 2017). Une partie de ces travaux théoriques et numériques a été confirmée par les observations des sondes WIND et STEREO (Krafft et al. 2014).

Ondes et instabilités dans les plasmas cométaires

L'épopée de Rosetta a permis d'étudier les processus de transport d'énergie associés à l'interaction entre le vent solaire et la magnétosphère induite d'une comète. Outre la déflexion du vent solaire par le plasma cométaire, associée ou non à la formation d'un choc d'étrave, une partie de l'énergie du vent solaire est déposée dans le champ électromagnétique à travers une série d'instabilités à différentes échelles. Rosetta a ainsi observé la génération d'ondes basse fréquence (quelques dizaines de mHz) résultant de l'interaction entre les ions du vent solaire, chargées en masse par l'ionisation de l'atmosphère cométaire en expansion dans le vent solaire, et les ions cométaires (cross ion beam instability; Richter et al. 2015), ainsi que l'apparition de structures miroirs (Volwerk et al. 2017). À plus petite échelle, la formation de forts gradients de densité dans la magnétosphère cométaire induite relaxe à travers la formation d'ondes hybrides basses (André et al. 2017). Enfin, aux échelles électrostatiques, la relaxation de faisceaux d'ions cométaires accélérés dans la région non magnétisée de l'ionosphère cométaire, la cavité diamagnétique, est observée à travers la génération d'ondes acoustiques ioniques (Gunell et al. 2017).

Perspectives

La thématique de turbulence et son rôle dans les processus de chauffage et d'accélération des particules du plasma devra connaître des développements importants dans les années à venir, grâce notamment à l'exploitation des données des missions spatiales MMS, *Parker Solar Probe* et *Solar Orbiter*. MMS, à l'instar de *Cluster*, devra aider à améliorer notre compréhension de la dynamique à très petite échelle des plasmas magnétosphériques. *Parker Solar Probe* et *Solar Orbiter* apporteront des mesures inédites sur la physique de la couronne et du vent solaire. Les missions *BepiColombo* et, à plus long terme, JUICE complèteront ce panorama en apportant des données dans des régions non explorées des environnements planétaires (Mercure et Jupiter). Ces développements sur le plan observationnel devront s'accompagner d'efforts théoriques et de modélisations. Il s'agira notamment de continuer à explorer la physique des très petites échelles avec des théories et codes fluides ou cinétiques adaptés (codes Vlasov, PIC, Hybrides, Landau-fluide).

Plus spécifiquement, les questions qui seront étudiées devront inclure :

- Comment le champ magnétique moyen du vent solaire influence-t-il la topologie des fluctuations turbulentes à différentes échelles ? Comment la turbulence évolue-t-elle avec la distance au Soleil ?
- Quelle est la nature de la turbulence tout le long de la cascade d'énergie jusqu'aux échelles électroniques ? Comment dépend-elle des paramètres du plasma ?
- Comment cette cascade se traduit-elle dans l'espace des phases ?
- Quelle est la nature de la cascade aux échelles sub-électroniques ? La cascade ultime ? Rôle des fluctuations électrostatiques ?
- Quels mécanismes contrôlent la dissipation d'énergie aux différentes échelles ?
- Comment identifier/quantifier chacun des mécanismes dans les simulations numériques et les observations des fonctions de distribution des particules ?

Mécanismes d'accélération et de chauffage du plasma

Contexte

Les mécanismes d'accélération et de chauffage du plasma entrent en jeu depuis la surface du Soleil jusqu'aux magnétosphères planétaires en passant par le milieu interplanétaire. Nous entendons par "accélération" deux catégories de processus: l'accélération du plasma dans son ensemble, comme dans le cas du vent solaire, et l'accélération de quelques particules à des énergies suprathermiques. La couronne solaire, où les particules ont une énergie thermique de l'ordre de 100 eV, est le siège de phénomènes éruptifs qui produisent aussi des flux de particules de très hautes énergies. Le vent solaire est une des sources de plasma des magnétosphères planétaires. Sur Terre, l'ionosphère est à l'origine d'un flux de plasma beaucoup moins énergétique (énergies typiques de quelques eV). Or, lors des éruptions solaires et dans différentes régions de la magnétosphère (queue magnétosphérique, zone aurorale), on trouve cependant des flux de particules dont l'énergie atteint plusieurs dizaines de keV ou même plusieurs MeV (ceintures de radiation) ou GeV (certaines éruptions solaires). Les manifestations visibles des particules accélérées dans la magnétosphère et 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 s'appuient sur des mesures in situ et des observations à distance des signatures de particules et des environnements plasma de leurs régions d'accélération, de propagation et d'émission.. Les 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).

Bilan 2014-2019

Couronne solaire

Evènements transitoires et chauffage de la couronne solaire

La couronne solaire est un milieu de température non-uniforme, allant de quelques milliers de K dans les protubérances à plusieurs millions dans les boucles coronales. L'étude des processus de conversion d'énergie dans ces plasmas est un sujet clef de la physique solaire et devrait nous fournir les éléments pour comprendre l'ubiquité de couronnes chaudes dans les étoiles de types F à M.

Les gros événements de chauffage lors des éruptions solaires ne suffisent pas à chauffer l'ensemble de la couronne solaire. De petites structures doivent donc être formées et dissipées, au cours de très petits événements appelés "nanoflares". La turbulence pourrait jouer un rôle pour transférer l'énergie injectée à grande échelle au niveau de la photosphère à des petites échelles auxquelles elle peut être dissipée. Joulin et al. (2016) ont déterminé l'énergie thermique de micro-événements de chauffage coronal ainsi que leurs pertes radiatives et par conduction. A partir de la détection de ces micro-événements dans les images EUV de SDO/AIA, et grâce à la base de données de cartes de mesure d'émission et de températures disponible à MEDOC (Guennou et al. 2012a, b), il a été possible de caractériser l'énergie des événements. Les statistiques obtenues montrent des distributions d'énergie en lois de puissance, sur plusieurs décades en énergie. Ces distributions indiquent que la puissance dissipée détectée ainsi dans les petits événements de chauffage reste

minoritaire dans la puissance totale de chauffage nécessaire pour maintenir la couronne aux hautes températures observées.

Une autre approche du problème du chauffage est l'utilisation du non-équilibre thermique comme traceur de la distribution spatio-temporelle du chauffage coronal. Si le chauffage est concentré aux pieds de boucles coronales et s'il est quasi-constant par rapport au temps de refroidissement du plasma, les boucles sont susceptibles d'entrer dans un régime dit de non-équilibre thermique (TNE) dans lequel aucun équilibre n'existe, ce qui résulte en un comportement intrinsèquement dynamique. Le plasma devient alors instable localement et le moindre apport de masse supplémentaire amorce un emballement thermique. La condensation qui s'ensuit se développe rapidement et tombe le long de la boucle dans la chromosphère; ce processus est invoqué pour expliquer la formation des protubérances ainsi que la «pluie coronale». Les résultats correspondants à l'analyse à long terme par SoHo/EIT et sur des milliers d'événements obtenus par SDO/AIA sont présentés dans la section « couplage avec les différentes enveloppes de plasma » de ce document.

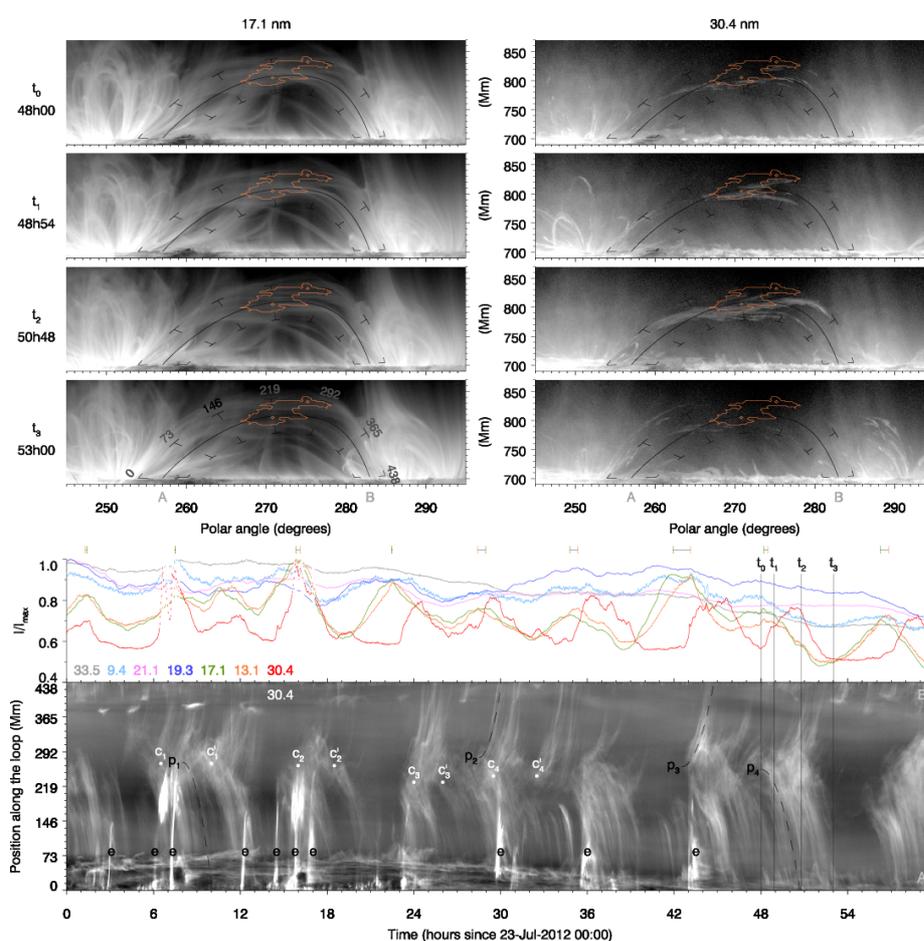


Figure 13 : Pulsations d'intensité et pluie coronale périodique observées avec SDO/AIA (Auchère et al. 2018).

Récemment, le phénomène de pulsations en intensité EUV a été identifié avec celui déjà connu de pluie coronale, comme indiqué par les modèles numériques pour lesquels ces deux phénomènes sont simplement deux manifestations du même processus physique de TNE. Auchère et al. (2018) ont découvert plusieurs événements de pluie coronale périodique se produisant simultanément et en phase avec des pulsations d'intensité EUV (Figure 13). Ces nouvelles observations indiquent de manière indubitable que, dans les cas de pluie coronale, et/ou de pulsations EUV, le chauffage des boucles est très stratifié et quasi-constant. L'objectif est donc maintenant d'utiliser les observations

de pulsations EUV et de pluie coronale pour contraindre de manière forte la distribution spatio-temporelle de chauffage dans les boucles.

Les écoulements prédits par les modèles numériques ont bien été détectés par effet Doppler dans les données du spectromètre-imageur EUV Hinode/EIS, mais ces observations n'ont pas permis d'identifier les vitesses prédites. Les pulsations détectées dans les densités ont une amplitude plus faible que celle prédite. La non-détection des pulsations dans les vitesses provient de la contamination du signal par des avant- et arrière-plans.

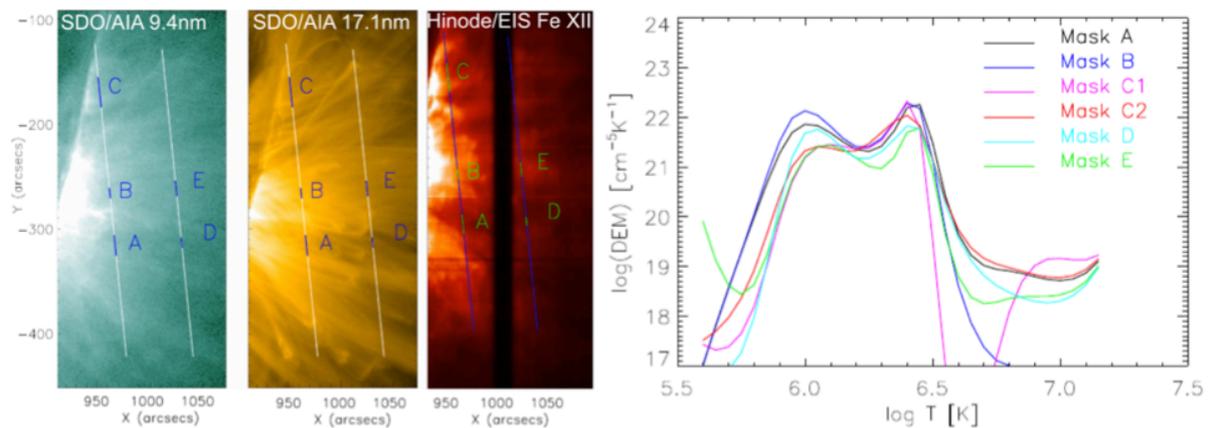


Figure 14 . Gauche : région active observée hors-disque avec SDO/AIA et Hinode/EIS, avec superposition des positions de la fente de SoHO/SUMER. Droite: mesure d'émission différentielle dans les différentes régions étudiées, obtenue à partir de Hinode/EIS et SoHO/SUMER, montrant dans la plupart des régions une quantité significative de plasma chaud ($\log T$ entre 6.5 et 7, soit T jusqu'à 10MK).

L'existence d'une émission de faible intensité a été identifiée à très haute température (~ 10 MK) en dehors d'éruptions. Avec des observations spectroscopiques de SoHO/SUMER et Hinode/EIS, Parenti et al. (2017) ont pu établir de manière quantitative la distribution spatiale et temporelle du plasma, au-dessus d'une région active (Figure 14).

Les diagnostics du plasma utilisés pour contraindre les mécanismes de chauffage reposent sur des hypothèses qui ne sont pas toujours vérifiées ; cela a été constaté avec la différence surprenante observée dans certains régions actives par SoHO/SUMER entre les profils des deux raies de C IV à 154.8 et 155.0nm, formées à moins de 100 000 K. Cette différence ne peut être le résultat des effets d'opacité, de mélange de raies ou de polarisation, mais elle a pu être expliquée par un modèle combinant effets radiatifs et vitesses différentielles dans des boucles de plasma voisines (Gontikakis & Vial 2016). Cette interprétation a été confirmée par l'analyse d'observations par IRIS des deux raies de Si IV à 139.4 et 140.3nm, formées à 80 000 K, comparées aux magnétogrammes de SDO/HMI (Gontikakis & Vial 2018). Ces travaux montrent la portée limitée des outils de diagnostic uniquement collisionnels.

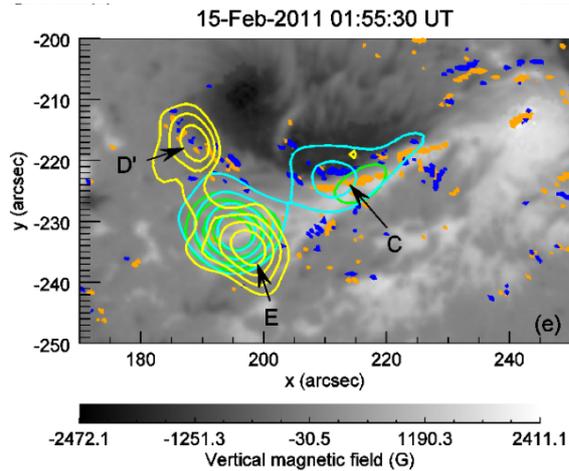


Figure 15: Comparaison de la distribution du champ magnétique (niveaux de gris) et des courants électriques (points orange et bleu) mesurée à partir des données HMI/SDO avec l'émission X (isolignes jaunes, vertes et cyan) observée avec RHESSI lors d'une éruption solaire de classe X.

Electrons énergétiques, courants électriques et rayonnement X dans l'atmosphère solaire

Plusieurs travaux ont porté sur les caractéristiques des régions d'accélération et d'interaction des particules dans l'atmosphère solaire et les caractéristiques des structures magnétiques où ont lieu les émissions de ces particules (Masson et al. 2017). La combinaison de cartes de champ magnétique vectoriel et de cartes de densité de courants électriques photosphériques déduites des observations de magnétographie (SDO/HMI) et spectro-imagerie en rayons X (RHESSI; Figure 15) a conduit à établir un lien entre sites d'interaction des électrons énergétiques et densités de courants électriques verticaux (Janvier et al. 2014, Musset et al. 2015) et de relier l'évolution temporelle et spatiale des courants à celle des émissions X observées avec RHESSI. Ces résultats s'interprètent dans le contexte de reconnections magnétiques se produisant de façon préférentielle dans les couches de courant au-dessus des boucles magnétiques dans la couronne et responsables de l'accélération d'électrons.

L'exploitation des capacités de spectro-imagerie de RHESSI a permis de mesurer les spectres d'énergie d'électrons à l'origine des émissions X à différents endroits dans les boucles éruptives et donc d'étudier le transport des électrons dans la couronne solaire. En combinant des observations de RHESSI avec les observations en imagerie radio fournis par le radiohéliographe de Nobeyama, Kontar et al. (2014) ont pu interpréter à la fois les émissions X et radio de cette éruption par le transport diffusif des électrons dans les boucles coronales. Cette interprétation implique que le libre parcours moyen diffusif des électrons diminue avec leur énergie, en accord avec des résultats antérieurs sur le libre parcours moyen diffusif des électrons dans le milieu interplanétaire (Musset et al. 2018).

Concernant la modélisation des émissions X, Pinto et al. (2015) ont présenté une simulation d'émission en rayons X thermiques produite à partir d'un modèle MHD de boucle coronale éruptive (dont l'évolution est simulée par le code PLUTO). Cette même simulation a par la suite été utilisée pour modéliser les émissions X dur produites par les électrons accélérés dans les couches de courant fragmentées (Pinto et al. 2016).

Electrons non thermiques en tant que traceurs de l'accélération dans la couronne

Un autre domaine fondamental concerne l'étude de la propagation des faisceaux d'électrons à partir de la région active vers la couronne (St-Hilaire et al. 2013, Reid et al. 2014, Reid & Vilmer 2017). Carley et al. (2015) ont caractérisé des sites d'accélération de faisceaux d'électrons produits lors du passage d'une onde de choc dans la couronne (sursauts de type « herringbone »). Le développement des éjections coronales de masse et des chocs associés a également été caractérisé à partir d'observation multi longueurs d'ondes, et en particulier d'observations en imagerie radio du Radiohéliographe de Nançay (NRH; Carley et al. 2016; Salas-Matamoros et al. 2016). Ces observations permettent en particulier d'identifier des sites d'accélération des électrons en liaison avec l'évolution du tube de flux magnétique torsadé qui est associé à la CME. Par ailleurs Carley et al. (2017) ont analysé les observations d'une source d'émission radio gyrosynchrotron d'une étendue exceptionnelle. La comparaison des observations radio (NRH, RSTN) avec les observations X du *Fermi Gamma Ray Burst Monitor* (GBM) et les images de l'éruption obtenues avec le *GOES Soft X-ray Imager* (SXI) ont été utilisées pour déterminer la valeur du champ magnétique dans la source coronale radio étendue (5.5G à une distance héliocentrique de 1.3 R_{\odot}), et les propriétés des électrons émettant les émissions X et radio dans l'éjection de masse (Carley et al. 2017).

L'événement étudié dans Salas-Matamorros et al. (2016) comprend différents sites d'accélération autour d'une éjection coronale de masse (voir Figure 16). Dans la basse couronne, le plasma est chauffé (émissions X et radio centimétriques, les deux courbes du bas), sans signature d'accélération des particules. Plus haut, les quatre images (150,9 MHz, Radiohéliographe de Nançay) montrent, de gauche à droite, le Soleil calme avant l'événement éruptif, une source brillante due aux électrons accélérés au-dessous de l'éjection de masse (2^{ème} et 4^{ème} images de gauche), puis une seconde source (3^{ème} de gauche) loin de la première. D'après les spectres (Réseau Décamétrique de Nançay NDA; spectrographe WAVES/sonde Wind) cette source est produite par des électrons s'échappant de la couronne. Des sites et processus d'accélération, reliés à la reconnexion magnétique entre l'éjection de masse et la couronne ambiante et à une onde de choc, injectent des particules de haute énergie dans un grand volume de l'Héliosphère, englobant environ 140° en longitude héliographique.

Accélération d'électrons énergétiques par ondes de Langmuir

Les faisceaux d'électrons peuvent induire une turbulence de Langmuir, dans un plasma comme celui du vent solaire, à un niveau pouvant conduire à la décomposition de l'onde. A partir d'une étude analytique couplée à des observations dans le vent solaire, Krafft & Volokitin (2014) ont montré que les ondes peuvent subir une seconde décomposition si la vitesse du faisceau ne dépassait pas 35 fois la vitesse thermique du plasma. Une étude ultérieure a permis de calculer les gains ou pertes en énergie du faisceau et des ondes en fonction des fluctuations de densité du plasma et de la vitesse de dérive du faisceau (Krafft & Volokitin 2017).

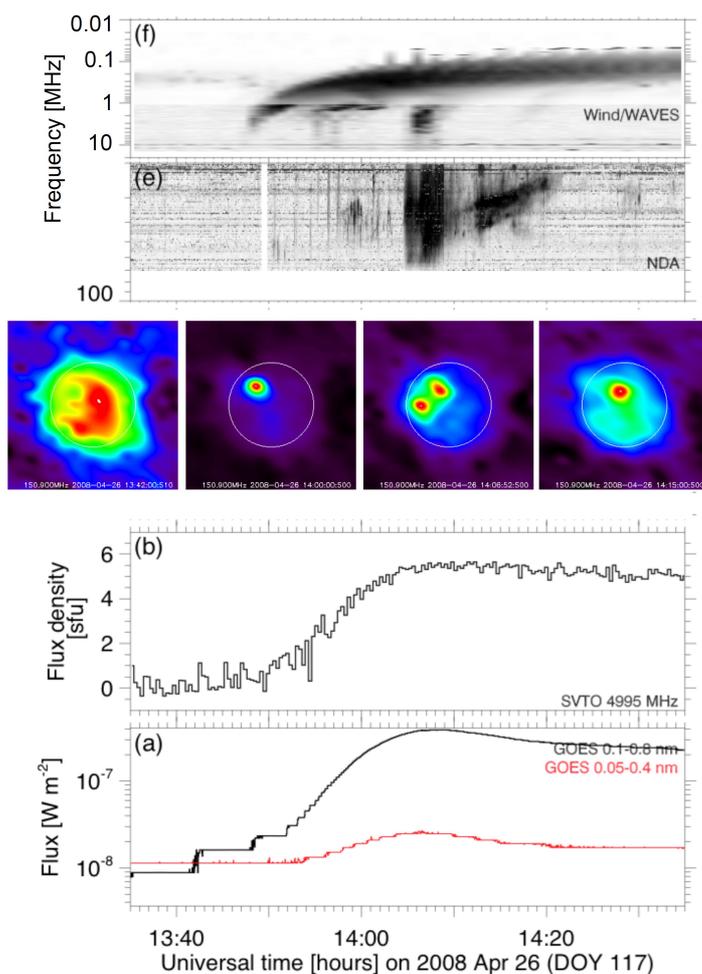


Figure 16. *Diagnostic multi-instruments et multi longueurs d'onde de l'accélération de particules énergétiques lors d'une éjection coronale de masse. Données de GOES (courbes du bas), du NRH (Radiohéliographe de Nançay; images centrales), ainsi que du NDA (Réseau décimétrique de Nançay) et de WAVES/WIND (spectres en haut)*

Accélération de protons relativistes

Les observations gamma (énergie des photons > 100 MeV) à haute sensibilité de l'expérience *Fermi*/LAT ont révélé que le Soleil produit des sursauts bien plus fréquemment, et parfois d'une durée bien plus importante, que l'on ne pensait. On pense que le rayonnement est produit par des protons et ions de haute énergie (>300 MeV/nuc) accélérés dans la couronne, puis précipités dans les couches collisionnelles de l'atmosphère solaire (la chromosphère) où le rayonnement gamma est généré. Une étude récente a démontré que les parties super-critiques des ondes de choc coronales sont capables de déclencher un processus d'accélération de particules et de produire des protons aux énergies supérieures au GeV (Afanasiev et al. 2018). Exploitant la modélisation des ondes de choc développée par Rouillard et al. (2016), Plotnikov et al. (2017) ont établi un lien étroit entre l'émission gamma et le moment où les ondes de choc super-critiques deviennent connectées magnétiquement avec la surface visible du Soleil. Ce scénario pointe vers une accélération des particules par l'onde de choc jusqu'à des distances au-delà de dix rayons solaires du Soleil. Dans le cadre du projet européen HESPERIA, une étude comparative avec les émissions X mous, X durs et radio d'électrons énergétiques pour un échantillon de 24 événements *Fermi*/LAT a conduit à une proposition différente (Klein et al. 2018). Cette étude trouve que les sursauts gamma étaient, dans environ la première heure, accompagnés d'émissions d'électrons non thermiques. Ceci suggère une accélération commune

des électrons et des protons dans la phase impulsive et bien au-delà, bien plus bas dans la couronne que ce que prédit l'accélération par onde de choc.

Environnement terrestre

Chauffage des électrons dans les structures intermittentes.

Les structures intermittentes, comme les feuillettes minces de plasma, sont abondantes dans les plasmas turbulents. Des simulations numériques montrent qu'elles peuvent être des régions de dissipation importante aux échelles cinétiques. Elles ont été récemment mises en évidence à partir des mesures haute résolution de *Cluster*, couplées à la méthode d'identification de telles régions (PVI, Partial Variance of Increments). Chasapis et al. (2015) ont pu montrer sur une base statistique que ces feuillettes minces, à l'échelle des protons, étaient effectivement le siège d'un chauffage important des électrons. Cette étude a été étendue aux observations des satellites MMS, ce qui a permis une mesure fiable de la température des électrons et d'expliquer leur chauffage à l'intérieur de ces structures. Chasapis et al. (2017) ont ainsi pu montrer la cohérence de ces signatures avec celles attendues dans un scénario de reconnexion magnétique.

Accélération des ions par l'onde de choc terrestre

Les ondes de choc sont des régions privilégiées d'accélération des particules, que l'on peut par exemple observer dans le détail dans le pré-choc terrestre. Des simulations récentes (Savoini et al. 2015) ont conduit à une meilleure compréhension des mécanismes d'accélération, de deux types de populations d'ion réfléchis, l'une gyrotropique, de faisceaux alignés le long du champ B, l'autre non gyrotropique. Ces simulations ont révélé que ces deux populations, produites par le choc lui-même, ont exactement la même origine.

Accélération dans la zone aurorale – génération de l'AKR

Les régions aurorales des planètes magnétisées sont aussi la source d'intenses émissions radio, appelées *Auroral Kilometric Radiation* (AKR) dans le cas terrestre. Ces émissions sont dues à des électrons accélérés le long des lignes de champ magnétique. L'analyse des données à haute résolution spatiale et temporelle de la mission FAST a montré le caractère asymétrique de la turbulence forte locale, induite par les électrons accélérés, conduisant à la formation de structures non linéaires, qui peuvent affecter la structure fine de l'AKR. La filamentation prédite pour le rayonnement a effectivement été observée dans les données de FAST et de CLUSTER (Pottelette et al. 2014, Pottelette & Berthomier 2017)

Chauffage et diffusion dans les ceintures de radiations

Les ceintures de radiations de la Terre ou d'autres planètes magnétisées sont le lieu d'interactions à l'origine du chauffage et de la diffusion du plasma hautes énergies.

Pour la Terre, Herrera (2017) a développé une modélisation raffinée de la dynamique des ceintures de radiation en prenant en compte la dépendance en temps local magnétique. Cette étude montre l'importance relative entre perte par diffusion et chauffage induits par les interactions avec les ondes de type Chorus pour des électrons d'énergies comprises entre la dizaine de keV et plusieurs MeV (Herrera et al. 2016). Par une étude paramétrique approfondie, le chauffage induit dans les ceintures de radiation a pu être quantifié en fonction de la nature de l'événement solaire à l'origine d'un orage géomagnétique (Bénacquista 2017). La réponse des ceintures de radiation terrestres aux CIRs et CMEs a ainsi été caractérisée à la fois en fonction de l'énergie des électrons et du paramètre L^* . Cette étude a en particulier mis en évidence l'importance de l'enchaînement d'événements dans l'intensité de la réponse des ceintures de radiations (Bénacquista et al. 2018). La [Figure 17](#) montre ces

résultats. La distribution des flux de 1 MeV a été estimée à l'aide de l'instrument MEPED à bord de NOAA-POES 15 en fonction de L^* . Sur cette figure on compare l'évolution de l'événement triple de Juillet 2004 (courbes blanches) avec cette distribution. Ce résultat novateur met en évidence le chauffage induit par une CME, en termes de séquences (impacts) et localisation du chauffage (régions des ceintures de radiation).

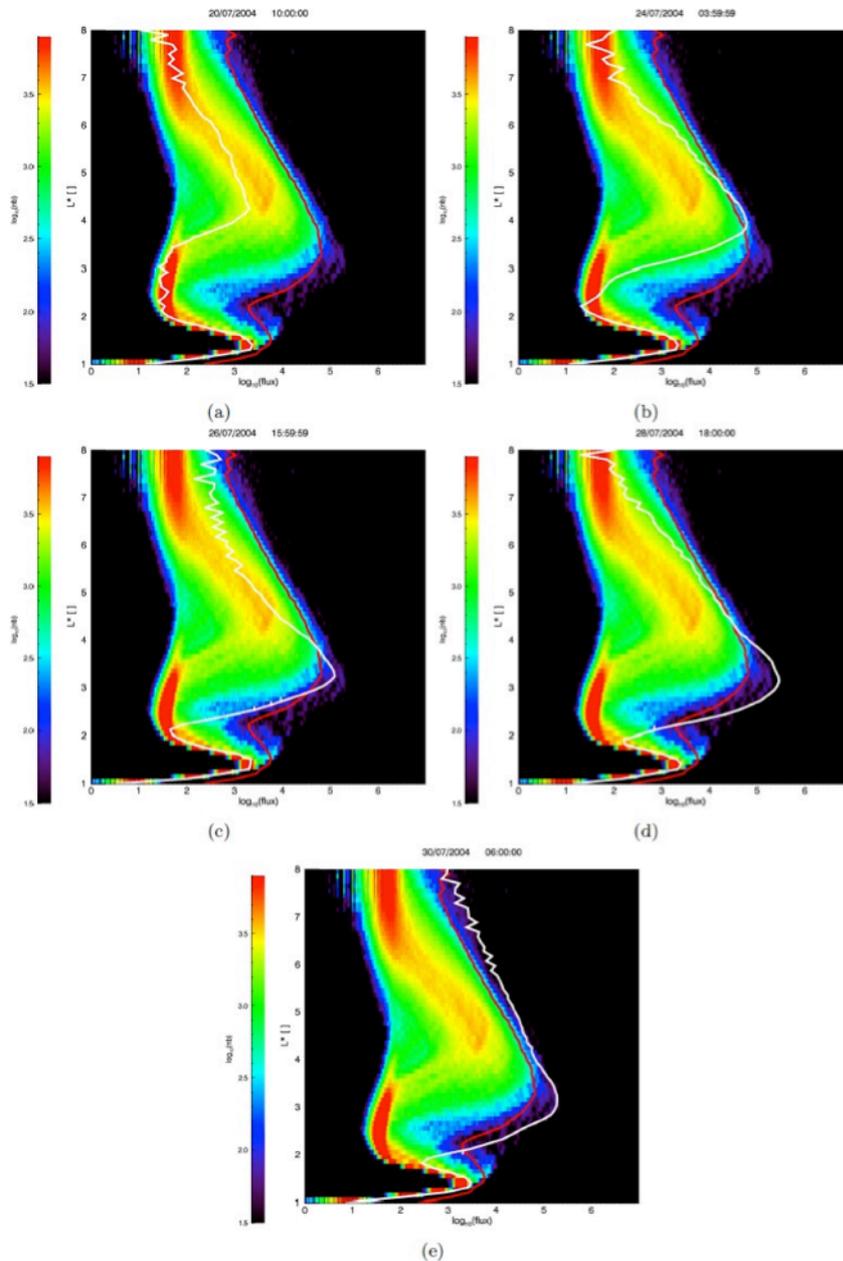


Figure 17. Comparaison entre les flux instantanés au cours du triple événement de juillet 2004 (courbes blanches) et l'histogramme de la distribution des flux d'électrons relativistes calculés à partir des données sur l'ensemble de la période d'étude. La figure (a) présente la charge relative des ceintures de radiation avant l'événement, la figure (b) après l'impact de la première CME, la figure (c) après le deuxième impact et la figure (d) après le troisième impact. Enfin la figure (e) montre la charge après deux jours après la fin des perturbations électromagnétiques. Cela montre que chaque impact charge davantage les ceintures de radiation et que le plasma est accéléré vers des L^* plus faibles (diffusion radiale). En fin d'événements, les interactions avec les ondes de type Chorus et la diffusion radiale vont encore chauffer le plasma (figure e) pour des L^* supérieurs à 4.

Echappement ionosphérique

Maes et al. (2015) ont étudié le rôle du rayonnement UV solaire sur le contrôle de l'échappement ionosphérique au-dessus des arcs des calottes polaires. Un effet important a été mis en avant sur les flux des ions O^+ en fonction des conditions d'éclairage solaire au pied des lignes de force magnétique (au niveau de la couche ionosphérique F), et en particulier en fonction de l'angle zénithal solaire. Un effet similaire, mais moins prononcé, existe aussi pour l'échappement des ions H^+ , avec de fortes implications pour les mécanismes d'échappement ionosphérique.

Vent solaire et milieu interplanétaire

Sur la base des données des sondes *Helios*, qui avaient approché le Soleil jusqu'à 0,3 UA dans les années 1976 à 1985, une étude de l'évolution radiale des températures des protons dans le vent solaire a été menée, différenciant les directions parallèle et perpendiculaire au champ magnétique interplanétaire. Le vent solaire étant un plasma magnétisé, il n'est pas attendu que les températures évoluent selon des lois polytropes (variations en $r^{-\alpha}$, où α est un coefficient constant). La réduction des données à des lois de puissance induit des erreurs systématiques dans l'estimation des taux de chauffage, particulièrement sensibles dans la direction parallèle au champ magnétique. Un résultat de cette étude est que, s'il existe incontestablement un chauffage perpendiculaire des protons dans le vent solaire, les données *Helios* ne permettent pas d'exclure une évolution adiabatique dans la direction parallèle (Zaslavsky et al. EGU, 2017).

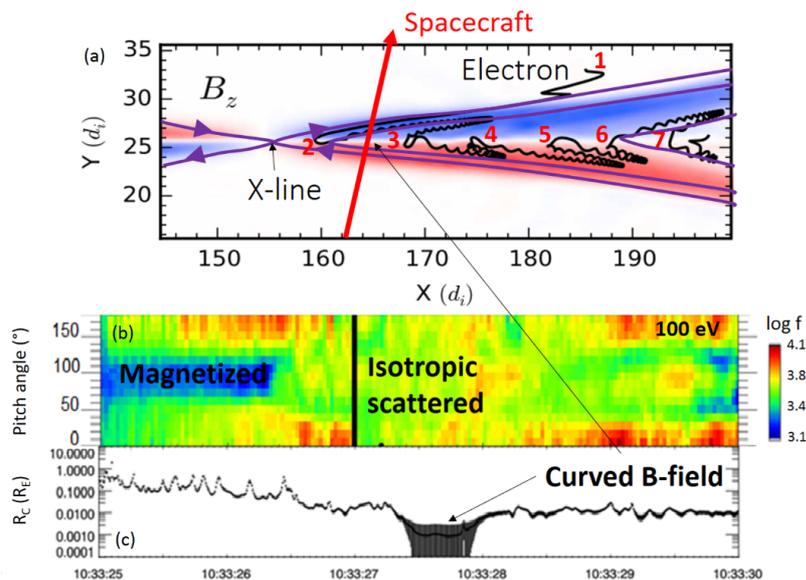


Figure 18. (a) Illustration d'une trajectoire d'électron (ligne noire) dans le champ magnétique (lignes violettes) proche d'une ligne de reconnexion. Les couleurs bleues et rouges montrent la composante du champ magnétique hors du plan (champ de « Hall »). Sept numéros dénotent des passages de l'électron proches de la couche de courant où le champ magnétique se retourne, et où les particules sont parfois réfléchies. illustration adaptée d'une simulation de Bessho et al. (2015). Une trajectoire illustrative du satellite MMS est montrée avec une flèche rouge, correspondant aux mesures des panneaux (b) et (c), adaptés de Lavraud et al. (2016): (b) angles d'attaque des distributions d'électrons à 100 eV au cours d'une traversée proche de la ligne de reconnexion (c) rayon de courbure du champ magnétique Le moment marqué par une ligne verticale rouge correspond à une « isotropisation » des électrons due à un processus de dispersion ayant lieu lorsque le rayon de giration des électrons devient comparable au rayon de courbure du champ magnétique (panneau b).

Avec l'instrumentation de nouvelle génération de la mission MMS, il a été possible d'étudier le phénomène de reconnexion magnétique, l'accélération des particules ainsi que le rôle de la turbulence dans les plasmas à l'échelle de la dynamique des électrons (voir par exemple Lavraud et al. 2016, Vernisse et al. 2017). Les observations de MMS ont démontré l'étroite relation entre le rayon de courbure des lignes de champ magnétique et le rayon de giration des électrons (de basse énergie) autour du champ magnétique (Lavraud et al. 2016; *Figure 18*). Les résultats mettent en exergue la dynamique fine des électrons dans la région de reconnexion magnétique, impliquant des processus de dispersion en angle et de piégeage complexes des particules.

Environnements planétaires

L'étude des émissions radio aurorales planétaires, produites par l'instabilité maser cyclotron (IMC), a bénéficié des mesures récentes uniques acquises en parallèle à Saturne avec Cassini et à Jupiter avec Juno amenant de nouvelles contraintes sur l'énergie des électrons source et les mécanismes d'énergisation associés.

A Saturne, l'étude statistique des mesures in situ de Cassini/RPWS et Cassini/MAG lors de ses passages de haute latitude dans les sources du rayonnement kilométrique a révélé que les 3.5-4.5 rayons planétaires de la planète) du rayonnement kilométrique (dont le spectre couvre 10-1000 kHz) sont produites perpendiculairement aux lignes de champ par l'instabilité maser cyclotron avec des électrons de 6-12 keV dans des zones de courant montant. Ces dernières sont responsables de l'accélération des électrons et de la formation de distributions dans l'espace des phases de type coquille. Les sources radio basse fréquence, ou haute altitude, sont de plus contrôlées par une densité de plasma froid magnétosphérique variable, dont une valeur trop haute « coupe » l'instabilité (Lamy et al. 2017).

Concernant les questions d'accélération aux chocs planétaires, on peut noter qu'Andrés et al. (2015) ont revisité la frontière spatiale des ondes ULF du pré-choc terrestre avec les données *Cluster*, alors que Shan et al. (2016, 2018) ont étudié le même type d'ondes et leur frontière à Vénus avec les données de *Venus Express*. Les interactions ondes-particules induisent un chauffage local du plasma comme dans d'autres contextes astrophysiques. Enfin, Méziane et al. (2018) ont réalisé la première analyse détaillée des populations du pré-choc électronique de Mars (à l'aide des données de MAVEN/SWEA) et de leur mécanisme de production au niveau du choc, alors que la première mise en évidence de l'ionisation par impact des électrons du pré-choc sur les atomes d'hydrogène neutre de l'exosphère a été faite dans Mazelle et al. (2018). Ces travaux peuvent permettre de contraindre le profil de densité des électrons à haute altitude.

La modélisation des ceintures de radiation de Jupiter permet d'étudier la diffusion radiale et les interactions ondes-particules. Le principal processus d'énergisation autour de Jupiter est la diffusion radiale dans le champ magnétique de la planète. Le développement récent des modèles physiques Salammbô-électron (Nénon et al. 2017) et Salammbô-proton (Nénon et al. 2018) pour Jupiter a permis de contraindre le coefficient de diffusion radiale par les mesures in-situ des électrons et protons.

L'interaction onde-particule est un processus de perte majeur au sein des ceintures de radiation d'électrons de Jupiter. Les flux extrêmes d'électrons au cœur des ceintures joviennes et l'effet sur les électrons piégés des ondes électromagnétiques de type "Hiss" et "Chorus" observées par la mission *Galileo* ont été intégrés au modèle physique Salammbô ; l'ajout de ce mécanisme physique permet de reproduire fidèlement les flux d'électrons mesurés in-situ (Nénon et al. 2017). Ces travaux mettent ainsi en évidence l'équilibre existant entre pertes et chauffage dans les ceintures de radiation.

Plusieurs études ont porté sur les mécanismes d'accélération associés à l'échappement du plasma dans le sillage de différents objets planétaires et la précipitation d'ions planétaires dans l'atmosphère.

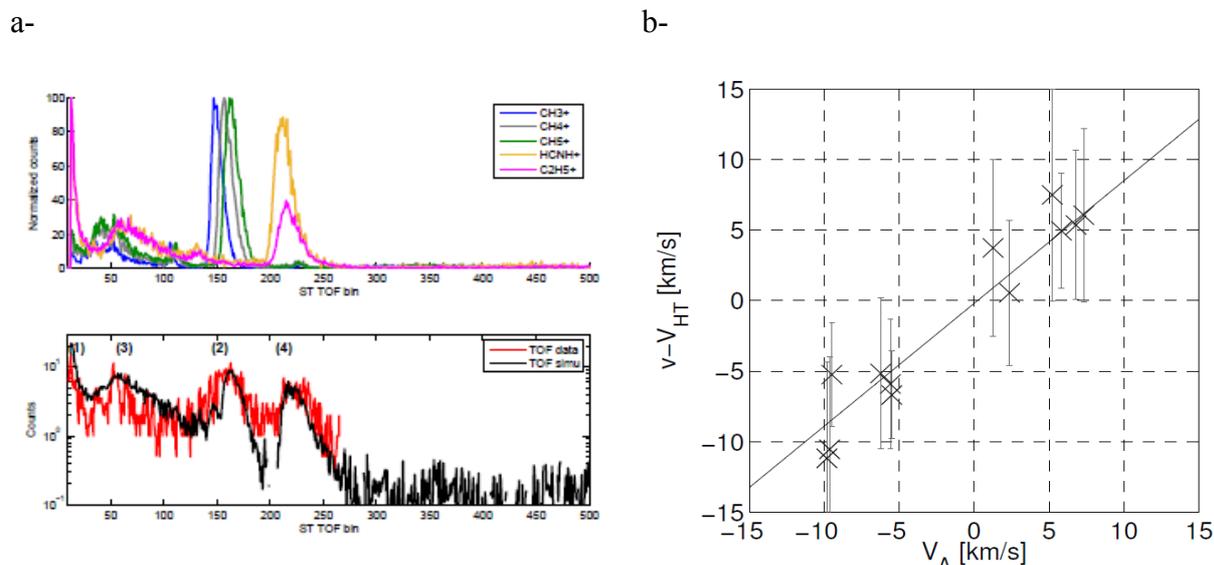


Figure 19. a- Composition du plasma dans le sillage de Titan observée par CAPS-IMS et comparée aux résultats de simulation. b- Test de Walén dans le sillage plasma de Titan pour le survol T40.

Les résultats montrent que les ions planétaires sont progressivement accélérés dans le sillage plasma de Titan. En analysant les mesures de CAPS (Spectromètre de masse), RWPS (expérience ondes) et MAG (magnétomètre) obtenus lors de trois survols de *Cassini*, nous avons pu déterminer la composition du plasma et sa distribution angulaire et en énergie. Ce travail a pu mettre en évidence que deux populations d'ions (de masses 15-17 uma et 28-31 uma), originaires de l'ionosphère de Titan (Figure 19a), s'échappent avec une accélération progressive dans le sillage de Titan, avec des vitesses allant de 9 à 20 km/s. Plusieurs mécanismes d'accélération ont été proposés : Romanelli et al. (2015) ont pu vérifier la relation de Walén (Figure 19b), qui lie la vitesse du plasma dans le repère de De Hoffman-Teller à la vitesse d'Alfvén, suggérant que les forces de tension magnétique participent à l'accélération de ce plasma.

Dans l'environnement proche de Titan, les ions pickup, issus de l'ionisation de l'enveloppe neutre de l'objet, sont accélérés par le champ électrique de convection de la magnétosphère externe de Saturne. Ces travaux montrent que les pickups se trouvent dans l'hémisphère du champ électrique de convection et qu'ils sont globalement localisés au voisinage du plan équatorial magnétique. Modolo et al. (2018) ont aussi mis en évidence une accélération progressive lorsque l'on s'éloigne de Titan, confortant les résultats de simulations globales.

Des travaux sur l'échappement martien ont été entrepris au moyen du modèle de simulation globale LatHyS permettant de caractériser les flux d'échappement ionique dans des conditions nominales du vent solaire (Modolo et al, 2016) et lors du passage d'une éjection de masse coronale (Romanelli et al, 2018). Ces travaux montrent que lors d'une CME les flux d'échappement sont significativement plus importants (augmentation d'un facteur 3 à 10 en fonction de l'espèce considérée) et sont en partie dues aux réactions d'échange de charge.

Par ailleurs une partie de ces ions planétaires, accélérés par le champ électrique de convection du vent solaire, peut sous certaines conditions être précipitée dans l'atmosphère martienne. Lorsqu'il s'agit d'ions lourds (O^+ ou O_2^+), ils sont suffisamment énergétiques pour participer au criblage de l'atmosphère. Des travaux portant à la fois sur l'analyse des données MAVEN et sur des résultats de

simulations montrent que ces précipitations ne sont pas aussi sporadiques que les études antérieures le laissaient penser (Leblanc et al, 2015) et ont permis de déterminer l'impact sur l'atmosphère de ces ions précipitants (Leblanc et al, 2017).

Interaction plasma/comète

Les observations de la sonde Rosetta ont montré l'importance du processus d'ionisation par impact électronique dans la formation d'un plasma cométaire ; c'est souvent le mécanisme dominant pour ioniser l'atmosphère cométaire en expansion à des distances héliocentriques > 2.5 UA (Héritier et al. 2017, 2018). Les mécanismes d'accélération et de chauffage des électrons qui sont à l'œuvre lors de l'interaction vent solaire-comète sont donc essentiels pour comprendre la formation des plasmas cométaires. Rosetta a observé la présence d'électrons supra-thermiques autour de la comète 67P/CG, à des niveaux nettement plus élevés que dans le vent solaire, potentiellement liés à (i) des processus de chauffage via des interactions ondes-particules (Broiles et al. 2016) éventuellement associées à la présence d'ondes hybrides basses elles-mêmes formées par des gradients de densité à petite échelle (André et al. 2017), ou (ii) l'accélération parallèle des électrons le long des lignes de champ magnétique (Madanian et al. 2016), associée au champ électrique ambipolaire formé par les gradients de densité à grande échelle autour de la comète. Ce dernier mécanisme a été confirmé par des simulations numériques cinétiques PIC de l'interaction vent solaire-comète (Deca et al. 2017).

Vents stellaires d'étoiles de type solaire

Une série de travaux sur le vent d'étoiles de type solaire a été menée par Réville et al. (2015 a,b). Cette étude s'est poursuivie sur le cas du Soleil jeune (Réville et al. 2016) et a été récemment complétée par l'étude du cycle 22 dans Réville & Brun (2017). Concernant le chauffage, Réville et al. (2016) ont adapté la température et la densité de background en fonction du taux de rotation de l'étoile et ont assimilé des données de magnétogrammes stellaire ou solaire dans les simulations pour effectuer un calcul global.

Perspectives

Solar Orbiter et *Parker Solar Probe* (PSP) permettront un pas en avant significatif dans les recherches sur l'accélération et le chauffage des plasmas solaires, grâce aux mesures près du Soleil. On peut s'attendre à des percées dans la compréhension de la formation du vent solaire, de son accélération ainsi que de transferts d'énergie qui le gouvernent. Les mesures près du Soleil verront aussi les particules de haute énergie et les ondes de choc bien moins affectées par la propagation interplanétaire que les mesures à 1 UA. Les observations d'électrons de haute énergie et de leurs rayonnements gamma à radio par TARANIS dans l'atmosphère terrestre fourniront d'autre part une gamme de diagnostics complémentaires sur les processus d'accélération qui ont aussi lieu dans la couronne solaire, mais que l'on ne pourra y étudier avec une richesse comparable de diagnostics.

Le problème du chauffage de la couronne solaire s'est révélé persistant. Les progrès sont réels dans cette thématique, notamment la reconnaissance que la couronne structurée par le champ magnétique est un milieu très hétérogène, avec des augmentations locales de la résistivité électrique, qui est très faible quand on regarde la couronne moyenne. Les populations non maxwelliennes de particules dans le vent solaire montrent d'autre part l'insuffisance d'une thermodynamique fondée sur les collisions. Dans les années à venir, tracer les particules non thermiques dans la couronne passera toujours par l'analyse des rayonnements. La possibilité de l'imagerie directe en rayons X durs, que laissent entrevoir les succès des vols fusée de l'expérience

FOXSI (USA), est d'un très grande intérêt. Ce diagnostic devra être exploité conjointement avec ceux en EUV, la magnétographie dans la chromosphère et la couronne et les mesures in situ près du Soleil. La communauté française a une expertise importante dans ce domaine, comme le montrent, à côté de son implication dans *Solar Orbiter*, les vols fusée de CLASP. La réalisation de la mission *Parker Solar Probe* stimule aussi les études des possibilités d'approcher une sonde spatiale de la basse couronne (concept de la mission *Icarus*) pour y effectuer des mesures in situ.

En parallèle, une autre problématique reste le manque d'observables des profils verticaux des émissions atomiques et moléculaires de l'airglow mais aussi des aurores dans la zone entre 100 à 300 km d'altitude. La proposition de l'instrument ATISE est de mesurer en continu sur plusieurs années depuis l'espace les spectres des aurores. Ce projet est fondamental pour la compréhension des mécanismes de dépôt des particules dans la thermosphère. L'observation spatiale présente plusieurs avantages : Tout d'abord les discontinuités dues à la couverture nuageuse sont éliminées. Mais le plus important est qu'une observation au limbe avec plusieurs lignes de visée permet de connaître le profil vertical de ces émissions et donc de reconstituer les dépôts des entrées énergétiques aux différentes altitudes. L'objectif est de couvrir un demi cycle solaire soit 5.5 ans, ce qui correspond plus au moins à la durée de vie maximale d'un nanosatellite dans une orbite autour de 600 km d'altitude.

Activité éruptive ou impulsive dans les plasmas

Contexte

Les activités éruptives et impulsives sont au cœur des principaux phénomènes transitoires des plasmas de l'héliosphère. Ces phénomènes correspondent fréquemment à des perturbations dominantes de l'état usuel des différents milieux, que ce soient les éruptions dans la couronne, les éjections coronales de masse dans le milieu interplanétaire, les orages magnétiques dans les magnétosphères terrestre et planétaires, etc. La compréhension des mécanismes physiques associés à ces phénomènes devient un enjeu majeur dans le cadre du développement de la discipline appliquée de la météorologie de l'espace (voir section *Météorologie de l'espace*).

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 un processus clef dans l'ensemble des domaines du PNST. C'est un sujet de recherche très dynamique, non seulement pour la physique des relations Soleil-Terre, mais aussi en Astrophysique (par exemple dans les processus d'accrétion et d'évacuation du moment cinétique) et en physique des plasmas de laboratoire, en particulier dans le cadre des expériences de fusion par confinement magnétique.

Durant la période 2014-2019, l'étude de la reconnexion dans la magnétosphère terrestre est dans une phase particulièrement riche, notamment grâce au lancement de la mission (MMS) par la NASA. MMS utilise quatre satellites identiques volant en formation, placés sur des orbites terrestres hautes. Le cœur des objectifs scientifiques de MMS porte sur la reconstitution de la structure et de la dynamique des régions où se produisent les reconnexions magnétiques dans la magnétosphère terrestre.

Bilan 2014-2019

Activité éruptive dans l'atmosphère solaire

L'atmosphère solaire est le siège d'événements violents et soudains : à grande échelle ce sont les éruptions solaires. Elles sont associées à une libération soudaine d'énergie magnétique, entraînant de forts embrillancements ainsi que d'éruptions solaires et d'éjections coronales de masse (CME pour "coronal mass ejection" en anglais).

L'étude du bilan énergétique des éruptions solaires reste un sujet important. Elle porte aussi sur la question de savoir s'il y a une relation physique entre les éruptions et le chauffage de l'atmosphère solaire. Dans ce domaine, la distribution des fluences est un paramètre clef: si cette distribution est dominée par les fluences faibles, on pourra penser que le chauffage de l'atmosphère résulte de nombreux événements individuels. La limite entre "plat" et "raide" est une distribution en loi de puissance avec un indice spectral 2. Utilisant des mesures systématiques des observations de l'irradiance solaire par la mission SDO, Kretzschmar (2015) a montré que l'indice spectral de la distribution en fluence pourrait dépendre de la raie spectrale et donc de la température considérées, étant plus faible que 2 pour des raies coronales, mais possiblement plus grand pour des raies chromosphériques. Ce n'est pas une réponse qui tranche, mais bien une contrainte sur les mécanismes de dépôt de l'énergie dans les basses couches de l'atmosphère solaire.

La reconnexion magnétique est un mécanisme central de ces phénomènes, permettant de dissiper sur des échelles de temps très petites une forte quantité de flux et d'énergie magnétique. Le développement de simulations numériques 3D, ainsi que les observations récentes à hautes

cadences temporelle et spatiale (notamment par les missions IRIS, SDO et l'expérience fusée Hi-C)) permettent de sonder les effets de ce mécanisme. L'analyse de la topologie 3D du champ magnétique de la couronne solaire, qui permet d'identifier les sites préférentiels de formation de nappes de courant électrique et donc les lieux de développement de la reconnexion magnétique, continue à demeurer une grande force de la communauté française. En particulier, l'analyse des données de modèles et simulations numériques 3D, comparée à l'évolution des éruptions dans les observations dans les domaines X et Extrême Ultra-violet, permettent de comprendre le rôle de la reconnexion magnétique comme principal moteur des éruptions solaires. De multiples travaux (Janvier et al. 2014, Dalmasse et al. 2015, Musset et al. 2015, Masson et al. 2017; voir *Figure 20*) ont permis de lier topologie du champ magnétique, sites observés des nappes de courant électrique, émissions X et EUV. Ces liens ont été établis non seulement de manière statique, à un instant donné, mais aussi de manière dynamique, tout du long de l'éruption et de l'évolution du champ magnétique [Janvier et al. 2016]. Ces résultats indiquent que l'évolution des structures magnétiques lors des éruptions et du rôle de la reconnexion magnétique peuvent être modélisées dans le modèle magnétohydrodynamique. Les travaux des dernières années ont permis de compléter le modèle standard des éruptions solaires en 3D (Janvier 2017).

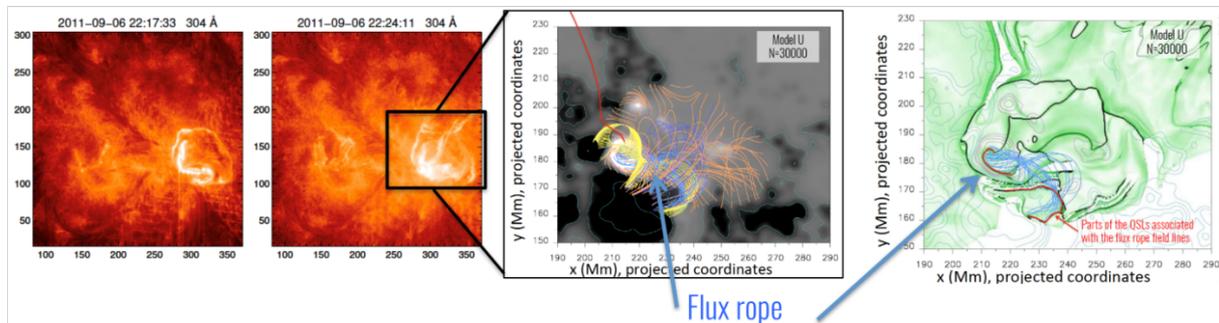


Figure 20. Comparaison entre la morphologie des rubans d'éruptions vus en 304 Å lors d'une éruption solaire et la topologie du champ magnétique obtenue à partir d'une reconstruction de champ magnétique. Cette comparaison permet de montrer la présence d'un tube de flux torsadé dont la dynamique est au coeur de l'éruption. (Adapté de Janvier et al. 2016)

La reconnexion magnétique 3D se développe dans les topologies complexes, tels que les couches quasi-séparatrices (QSLs). Ceci entraîne des modes spécifiques de reconnexion avec une dynamique particulière de l'évolution de la connectivité des lignes de champ magnétique : la reconnexion magnétique glissante. Les toutes premières preuves observationnelles du glissement des lignes de champ lors des éruptions solaires comme prédit par les modèles numériques MHD 3D ont été obtenues grâce à la haute cadence temporelle de l'instrument AIA/SDO (Masson et al. 2017) et ont là aussi confirmé les prédictions théoriques et modèles numériques MHD.

L'activité solaire ne concerne pas uniquement les éruptions, mais couvre de nombreuses échelles. Ainsi les jets observés à différentes échelles dans la couronne, la chromosphère et la photosphère solaire constituent des événements éruptifs d'échelle intermédiaire. La modélisation MHD 3D paramétrique de ce type d'événements a été poursuivie. Elle a là-aussi montré le rôle clé de la reconnexion magnétique (Pariat et al. 2015). Des simulations MHD paramétriques à différentes valeurs du paramètre beta du plasma, permettant de simuler ces jets à différentes échelles, ont ainsi montré que les émissions observées lors des jets ne correspondent vraisemblablement pas à des mouvements de groupe du plasma, mais plutôt à la propagation d'ondes Alfvéniques non-linéaires (Pariat et al. 2016).

Si la reconnexion magnétique est un processus central des phénomènes éruptifs, elle n'explique pas à elle seule l'ensemble des phénomènes. Les éruptions solaires peuvent présenter différentes dynamiques : elles peuvent être confinées (sans éjection de matière), éruptives ratées (un

déplacement de matière a lieu, mais reste limité à la couronne), éruptives (une CME est produite et se propage dans le milieu interplanétaire) ou donner lieu à un jet. La configuration globale du champ magnétique est essentielle pour expliquer la dynamique observée des éruptions. La présence de champ magnétique plus ou moins important autour du site d'éruption est centrale pour expliquer l'évolution du système (Masson et al. 2017, Amari et al. 2018).

Les équipes françaises se sont aussi penchées sur la physique du déclenchement des évènements éruptifs, qui reste un des problèmes majeurs de physique solaire. Plusieurs avancées ont été obtenues ces dernières années. Les travaux récents tendent à indiquer qu'une instabilité MHD globale, l'instabilité de Tore, serait responsable du déclenchement des éruptions solaires (Amari et al. 2014, Zuccarello et al. 2015, Pariat et al. 2018). En étudiant la genèse d'éruptions réelles produites en 2006 et en 2014, en combinant des observations du champ magnétique (instruments MDI/SOHO, HMI/SDO, SOT/Hinode) et des émissions chromosphérique (IRIS) et coronales (EIT/SOHO, EU/STEREO, AIA/SDO, XRT/SDO) avec des modèles, il a été montré que ces éruptions étaient associées à la formation/présence d'une structure magnétique (tube de flux torsadé) évoluant vers l'instabilité de Tore (Amari et al. 2014). Ces travaux ont permis de reproduire l'éruption d'une CME en très bon accord avec les observations multi-instrumentales sol et espace. Des simulations numériques MHD paramétriques ont permis d'identifier la nature et les valeurs que peuvent prendre le seuil de déclenchement des éjections coronales de masse (Zuccarello et al. 2015; *Figure 21*). Elles montrent sans équivoque (1) que la nature du seuil est unique, telle que prédite par le modèle analytique, et (2) que la valeur de ce seuil est tout aussi unique, quelles que soient les propriétés intrinsèques des tubes de flux torsadés dans la couronne solaire, et quel que soit le détail des mouvements de matière à la surface du Soleil. L'analyse de données d'observations a montré que la mesure de ce seuil pouvait néanmoins souffrir de biais observationnels (Zuccarello et al. 2015). Enfin, l'étude de l'hélicité magnétique permettra éventuellement une mesure directe du seuil d'instabilité (Pariat et al. 2017, Zuccarello et al. 2018).

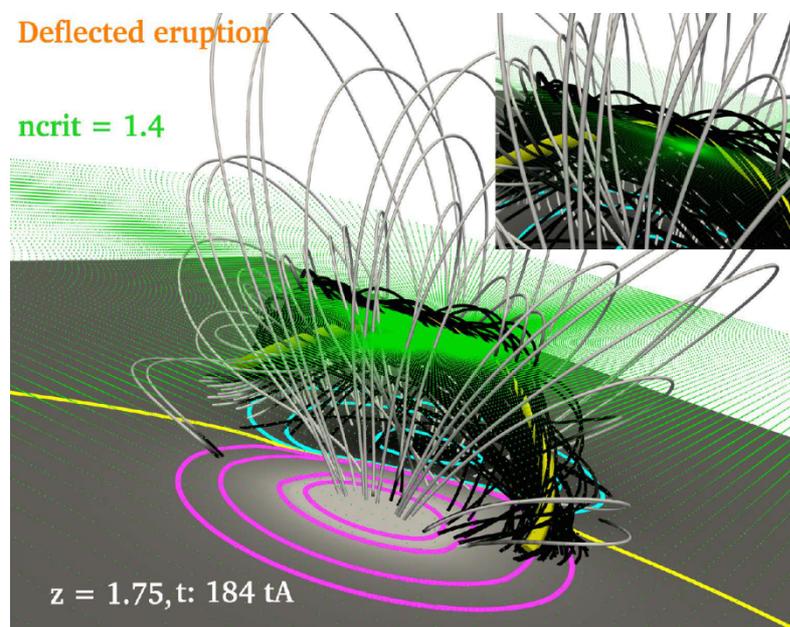


Figure 21. Exemple d'un tube de flux magnétique ("corde magnétique") torsadé dans la couronne solaire (en noir), au moment où la partie la plus élevée de sa ligne de champ axiale (en jaune) passe le seuil d'instabilité de la corde, à l'altitude du plan en vert issue d'une série de simulations MHD 3D paramétrique. [Adapté de Zuccarello et al. 2015].

Activité impulsive dans le milieu interplanétaire

Les éjections de masse (CMEs) produites lors des éruptions solaires constituent des perturbations majeures du milieu interplanétaire. La physique de ce milieu est soudainement dominée par les phénomènes et processus associés à la propagation des CMEs. Cette propagation induit entre autre la formation d'ondes de choc. Des techniques de triangulation des ondes de choc dans la couronne et le vent solaire ont été développées et exploitées avec des données STEREO, SoHO et SDO. En combinant cette triangulation à une modélisation 3-D de la couronne (Pinto et Rouillard 2017) on peut en déduire les propriétés 3-D du choc (vitesse, nombre de Mach, géométrie; Rouillard et al. 2016). Ces nouvelles techniques ont également permis d'étudier le lien entre ces ondes et les émissions radio, X, gamma et les particules énergétiques mesurées dans l'héliosphère (Salas-Matamoros et al. 2016 ; Rouillard et al. 2016 ; Plotnikov et al. 2017 ; Zucca et al. 2018).

L'omniprésence de la reconnexion magnétique semble aussi se manifester dans la génération du vent solaire lent, qui n'est pas considéré comme un phénomène "éruptif": à l'aide des observations en imagerie et in situ provenant de plusieurs satellites dans l'héliosphère, notamment SoHO et STEREO, il a été démontré que les tubes de flux observés dans le vent lent proche de la couche de courant héliosphérique résultent du processus de reconnexion magnétique ayant lieu séquentiellement sur des régions étendues des grands jets ("streamers"; Sanchez-Diaz et al. 2016, 2017a, b). Ce processus crée d'une part des boucles se retractant vers le Soleil et expulse d'autre part vers le milieu interplanétaire une structure de champs magnétiques torsadés magnétiquement connectée au Soleil. La ligne de reconnexion derrière la structure de champ magnétique torsadé se remplit de plasma dense contenant des lignes de champ magnétiques déconnectées du Soleil. Ce plasma dense est observé en imagerie sous la forme de "blob".

Activité impulsive dans la magnétosphère terrestre

Dans la magnétosphère terrestre la reconnexion magnétique se produit dans deux grandes régions: coté jour, à la magnétopause, elle permet le transport de matière, d'impulsion et d'énergie du vent solaire vers la cavité magnétosphérique. Lorsqu'elle se produit coté nuit, dans la queue magnétosphérique, elle joue un rôle important dans la libération impulsive de l'énergie préalablement stockée dans le système à la suite de la reconnexion coté jour. Comme nous l'avons dit auparavant, la mission MMS est devenu l'outil de choix pour étudier la microphysique de la reconnexion magnétique.

Concernant les processus impulsifs, et dans le cadre de la queue de la magnétosphère terrestre, un nouveau modèle théorique a été élaboré (Tur et al. 2014, Fruit et al. 2017). Ce modèle décrit l'interaction résonante entre perturbations électromagnétiques et le mouvement de rebond des électrons piégés dans le champ magnétique pour tenter d'expliquer l'origine des instabilités qui conduisent à la rupture de l'équilibre magnétique d'une couche de courant (sous-orages magnétosphériques, éruptions solaires, etc.). De plus, dans la queue de la magnétosphère, la libération d'énergie associée aux reconnexions mène à une relaxation ("dipolarisation") de la configuration magnétique globale. Ce processus conduit à l'observation des "fronts de dipolarisation", structures formées par l'empilement du champ magnétique en aval de jets de plasma. Ces fronts sont d'une grande importance puisqu'il semble qu'une grande partie de l'énergie libérée y soit dissipée. L'analyse de données de MMS dans la queue montre que la dynamique des fronts de dipolarisation est en grande partie dictée par des mécanismes se déroulant à des échelles sub-ioniques (Breuillard et al. 2016). Dans la queue magnétique, la structure quadrupolaire de la composante Y du champ magnétique (la composante azimutale) est

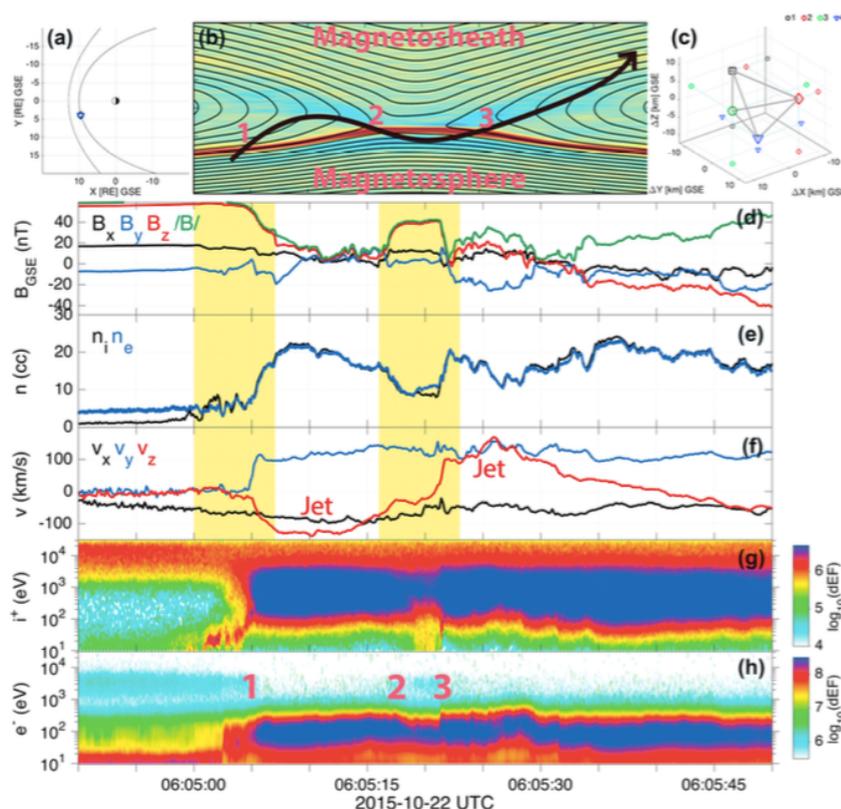


Figure 22. *Panneaux d-h) champ magnétique, densité de particules, vitesse moyenne et spectrogrammes ioniques et électroniques, mesurés par un des quatre satellites de la mission MMS lors d'une traversée de magnétopause interprétée comme une région proche d'un site de reconnexion magnétique. Les régions jaunes indiquent la présence d'ions froids et leur chauffage aux abords de la séparatrice magnétosphérique. Les panneaux a, et c donnent la position et la configuration du tétraèdre MMS, le panel b) montre la trajectoire relative des satellites par rapport aux site de reconnexion dans une simulation de J. Dargent, permettant d'interpréter les données in situ.*

souvent vue comme une conséquence de la reconnexion non collisionnelle. Cependant Smets et al. (2014) montrent que cette structure peut également s'observer dans de fines couches de courant en présence de courbure, et ce avant même le déclenchement de la reconnexion (voir section Mécanismes d'accélération et de chauffage du plasma).

A la magnétopause, l'une des grandes difficultés vient de l'asymétrie de l'environnement, séparant le plasma de la magnétogaine du plasma magnétosphérique comparativement chaud et ténu. En particulier, dans une telle asymétrie, il est compliqué de trouver une configuration d'équilibre non-collisionnel, pourtant préalable à toute étude d'instabilité de la couche de courant. Dorville et al. (2014) ont généralisé une classe d'équilibres cinétiques asymétriques préalablement étudiée en France (voir le précédent rapport d'activité du PNST) à des configurations magnétiques non-coplanaires et à la présence d'un champ électrique normal à la couche de courant, configurations bien plus réalistes pour l'étude de la magnétopause terrestre. Des simulations cinétiques ont montré que la stationnarité de tels équilibres ne nécessitait pas un traitement cinétique des électrons (Dargent et al. 2016, cf Figure 22). Le traitement cinétique des électrons est néanmoins nécessaire pour comprendre comment la reconnexion magnétique se produit.

Avec des résolutions temporelle et spatiale bien plus fines que sur les missions précédentes, MMS permet d'étudier la structure interne de la magnétopause et en particulier comment celle-ci est modifiée en présence de reconnexion magnétique. De nouvelles méthodes d'analyse de données in-

situ ont été mises au point pour déterminer la normale locale aux structures internes avec plus de précision. Elles ont notamment montré que la magnétopause peut se décomposer en plusieurs frontières couplées de types rotationnelles et compressionnelles (Dorville et al 2014a,b, Rezeau et al. 2018). Dans une configuration non coplanaire, la détermination de la normale à la magnétopause ne permet cependant pas de caractériser entièrement la géométrie de la reconnexion magnétique, puisqu'il reste un doute sur le rôle des composantes tangentielles. Afin d'apporter des réponses à cette question, Aunai et al. (2016) ont montré à l'aide de simulations hybrides PIC que la ligne X, dans le cadre de la reconnexion asymétrique non-coplanaire, semble préférentiellement s'orienter dans la direction de la bissection des champs magnétiques de part et d'autre de la couche de courant.

La présence d'ions froids d'origine ionosphérique comme constituant non négligeable du plasma magnétosphérique est bien connue depuis des années. Cependant leur rôle dans le processus de reconnexion est resté longtemps inconnu. Leur rôle est mieux compris au travers de l'étude de données Cluster puis MMS (Toledo et al. 2016a, b) et des simulations numériques (Dargent et al. 2017). La présence de cette population d'ions froids a des implications fortes aussi bien sur (1) la microphysique de la reconnexion, ajoutant des échelles physiques supplémentaires et affectant le chauffage et la dynamique fine des particules (Dargent et al. 2017, Toledo-Redondo et al. 2016a, b, 2017), que (2) sur la dynamique globale de la reconnexion, en induisant en particulier un processus de "mass-loading" qui entraîne une réduction majeure du taux de reconnexion et donc une réduction du couplage global. En particulier ces ions très froids, au rayon de Larmor très petit par rapport aux autres populations, modifient les structures attendues aux échelles sub-ioniques, en particulier à proximité du site de reconnexion. Les simulations PIC montrent également comment ces ions froids sont accélérés et chauffés au passage des séparatrices et la structure caractéristique en forme de "croissant" que prend alors leur fonction de distribution.

Activité impulsive dans l'ionosphère

Observés depuis l'orbite basse, les Terrestrial Gamma ray Flashes (TGF) sont de brefs ($\sim 100 \mu\text{s}$) et intenses bouffées de rayons gamma qui résultent de la production de rayonnement de freinage par des électrons de haute énergie dans des nuages orageux. En se propageant vers l'espace, ces photons produisent des électrons et positrons secondaires de haute énergie (jusqu'à plusieurs dizaines de MeV) qui excitent efficacement les molécules de l'atmosphère. Il a été récemment prédit que l'intensité lumineuse résultant de ces états excités est significative et pourrait être mesurée (Xu et al. 2017). Ceci ouvre une nouvelle perspective dans l'étude des TGF et de leur impact dans le système atmosphère-ionosphère par l'observation des émissions optiques associées.

Des efforts théoriques ont aussi été menés sur les phénomènes d'accélération des électrons pouvant donner lieu à des TGF. On peut noter en particulier les travaux sur la variabilité du spectre (Celestin et al. 2015, Cramer et al. 2017) et sur les émissions optiques à la source des TGF (Xu et al. 2015).

Certains des électrons et positrons secondaires de haute énergie produits par les TGF sont injectés dans le proche environnement spatial. Ces événements, appelés Terrestrial Electron Beam (TEB), ont été prédits et découverts en 2008. Leurs effets dans le proche environnement spatial sont encore peu connus. Sarria et al. (2015) ont présenté un modèle Monte Carlo pour l'étude du transport des photons, des électrons et positrons relativistes dans l'atmosphère terrestre dans le but d'étudier les processus sources des photons et électrons atteignant l'altitude du satellite : en particulier, la proportion de photons qui s'échappent par rapport au nombre de photons initiaux en fonction des propriétés de la source (notamment son altitude). Un des premiers résultats est que la taille des faisceaux d'électrons est vraisemblablement plus grande à l'altitude du satellite que les estimations précédentes.

En outre, un événement détecté par le satellite *Fermi* (NASA) et identifié a posteriori comme un TEB a été modélisé avec ce modèle Monte Carlo (Sarria et al. 2016). Plus spécifiquement, l'étude a porté sur la durée de l'événement qui résulte de réflexions multiples du faisceau aux points miroir conjugués et une attention particulière a été portée sur l'angle d'attaque de ces particules incidentes, dans une perspective d'inversion des mesures qui seront réalisées par le détecteur d'électrons IDEE à bord de la mission TARANIS. Sarria et al. (2017) ont également estimé les taux de détection des événements TGF et TEB par les instruments de la mission TARANIS. Ainsi, malgré l'orbite polaire, on peut estimer que l'instrument gamma à bord de TARANIS (XGRE) détectera environ 200 TGF par an et IDEE+XGRE détecteront 25 TEB par an.

La préparation de TARANIS

TARANIS fera des observations inédites par leur complémentarité des phénomènes d'électricité atmosphérique et de ses relations avec l'environnement plasma de la Terre. Une riche variété d'activités scientifiques a lieu dans la préparation de cette mission. Ainsi, en utilisant les propriétés de désexcitation collisionnelle d'états électroniques de la molécule d'azote, Ihaddadene et Célestin (2017) ont démontré qu'il est possible de quantifier d'une part le champ électrique dans les filaments de plasma formant les sprites, mais également d'estimer l'altitude de propagation du front du filament à travers certains ratios de populations de ces états. Ce type d'étude devrait permettre d'optimiser le retour scientifique des missions spatiales proposant d'effectuer des observations spectrophotométriques de sprites au nadir (notamment TARANIS (CNES) et ASIM (ESA)).

Le développement de l'activité de recherches sur l'électricité atmosphérique a permis d'initier des actions communes entre les équipes plasmas spatiaux et atmosphère avec un projet ballon (OREO). Une thèse sur la modélisation de l'impact des TLE sur la physico-chimie de l'atmosphère a débuté en 2016. En parallèle, depuis 2010, des collaborations internationales et nationales ont été mises en place : programme de recherche collaboratif de l'European Science Foundation TEA-IS (*Thunderstorm Effects on the Atmosphere-Ionosphere System*, 2011–2016; organisation d'une école d'été en 2014), activité *LABoratory of MUlti-Satellite Studies of Atmosphere-Ionosphere Electric Coupling* du GdRI Franco-Russe Helio-Plasmas, projet SOLID (*Space-based Optical Lightning Detection*, LA Toulouse), projet interdisciplinaire LICORNE (*Lightning and COsmic Rays in Natural Environment*, EMN/Subatech).

Activité impulsive dans les ionosphères et magnétosphères planétaires

La dynamique des magnétosphères de Jupiter, Saturne et Uranus et les liens entre activité due au vent solaire et activité résultant de la dynamique interne du système principalement contrôlée par la rotation restent un sujet d'étude majeur pour les planètes géantes (Blanc et al. 2015, Louarn et al. 2015, 2016, Blanc & Nagy 2015, Kotova et al. 2015, Lamy et al. 2017, Griton et al. 2018).

Dans le cas de la magnétosphère interne de Saturne, le plasma en co-rotation rattrape les satellites de glace, qui génèrent un sillage par absorption des ions énergétiques. Ces signatures d'absorption dépendent fortement de l'énergie et de la masse des ions (lorsque leur rayon de giration approche la taille de la lune), ainsi que de la position relative sonde/satellite. En comparant des simulations de telles signatures d'absorption aux observations *Cassini* des ions, Kotova et al. (2015) ont montré le rôle prépondérant du drapage des lignes de champ magnétiques autour des satellites et la signature d'ions lourds (O^+ , He^+ , O^{++} , He^{++} , OH^+ , H_2O^+).

Perspectives

Des progrès importants ont été réalisés dans les dernières années dans les études détaillées de la reconnexion magnétique, par la combinaison de la modélisation et des observations fines. La poursuite de l'exploitation de la mission MMS, dont l'analyse des données entrera dans sa phase de

maturité, apportera des informations inégalées sur le phénomène de la reconnexion magnétique. Les connaissances acquises dans ces domaines s'appliqueront aux autres plasmas héliosphériques, où *Parker Solar Probe* et *Solar Orbiter* apporteront des regards nouveaux sur la contrepartie des événements éruptifs dans le milieu interplanétaire. Les données combinées in-situ et à distance de *Solar Orbiter* procureront des observations inédites. L'impact des deux missions sera renforcé par le soutien sol. Finalement la mission *Taranis* emportera une instrumentation complémentaire imagerie-spectrographie X/gamma/radio-détection de particules qui produira des données inédites sur les événements impulsifs ionosphériques, les TGFs et les TEB.

La thématique de l'activité et de l'impulsivité, de par sa nature, reste néanmoins très fortement portée par les développements en calcul numérique et l'exploitation d'expérimentations numériques. Le développement de nouveaux outils numériques (voir l'Annexe 2: Codes numériques, pour une liste des codes développés ou utilisés par la communauté) est au moins aussi important pour la compréhension du mécanisme de reconnexion magnétique, puisque ses détails ne sont que très partiellement observables, que ce soit par les instruments in-situ dans la magnétosphère, les imageurs de la couronne solaire ou dans les expériences de laboratoire. Ainsi la conception de codes de simulations numériques de nouvelle génération, tel le code particulière SMILEI, le code Hybride PHARE, le code MHD OHM-MPI sera fondamentale pour comprendre le transfert d'énergie à différentes échelles lors de la reconnexion magnétique. Dans cette perspective, les efforts pour coupler des codes et expériences numériques utilisant des descriptions physiques distinctes s'avèreront fondamentaux.

Météorologie de l'espace

Contexte

La Météorologie de l'Espace (ME) vise *in fine* la prévision de l'impact d'événements solaires sur l'environnement terrestre au sens large. Cependant les processus physiques à l'œuvre tout au long de la chaîne Soleil - Terre ne sont pas complètement compris, ce qui nécessite des travaux en recherche fondamentale bien en amont. Plusieurs documents et articles sont apparus ces dernières années faisant le bilan des atouts observationnels, numériques et techniques issus de la communauté académique française potentiellement utiles aux efforts nationaux et internationaux en ME. Dans certains domaines comme la physique ionosphérique et thermosphérique, des modèles matures et performants ont vu le jour ces dernières années en France. Ils pourraient être intégrés dans des systèmes prédictifs répondant potentiellement aux besoins de l'industrie et des instances nationales préoccupées par les aléas de la ME. Malgré tout, même dans ces domaines une transition entre la recherche fondamentale et ses applications en ME nécessite typiquement un travail important afin de rendre modèles et outils scientifiques suffisamment performants pour répondre aux contraintes opérationnelles. Pour cela, des techniques souvent peu utilisées en recherche fondamentale comme par exemple l'assimilation des données ou l'apprentissage automatique, peuvent être combinées aux outils existants afin notamment de contraindre et de corriger les modèles en temps réel. Des échanges entre chercheurs et utilisateurs sont aussi nécessaires afin d'adapter les produits pour qu'ils répondent réellement au besoin.

La communauté scientifique a prôné depuis longtemps que la météorologie de l'espace devrait être considérée comme un risque naturel. Elle a collaboré dans ce domaine avec des utilisateurs potentiels en dehors de la recherche. Dans les dernières années, la réponse des utilisateurs potentiels s'est précisée: l'aviation civile a réalisé le rôle du rayonnement cosmique dans les doses de radiation reçues par le personnel navigant, l'Armée de l'Air a créé un centre expérimental de météorologie de l'espace et de nouveau l'aviation civile, au niveau mondial, met sur pied un service opérationnel à partir de 2019.

Faits marquants

L'évolution du contexte national

Afin de coordonner ce type d'activité et ainsi de rendre l'échange recherche-utilisateurs plus probable et efficace en vue de définir le besoin des utilisateurs de la ME, l'INSU, le CNES, le CEA et l'ONERA ont créé en 2017 l'*Organisation Française pour la Recherche Appliquée en Météorologie de l'Espace* (OFRAME). L'OFRAME vise à structurer les activités de ME au sein de la communauté scientifique française, d'identifier des actions concrètes permettant de mettre en valeur certains atouts issus de la recherche encore sous-valorisés en ME, de permettre un réel échange entre les chercheurs et les utilisateurs de la ME et de former la prochaine génération d'ingénieurs et de chercheurs qui voudrait s'impliquer en ME. Nous distinguerons donc dans ce rapport des activités du PNST et de sa prospective associée, les activités de recherche en amont de la ME lorsque celles-ci ont un impact direct sur des services opérationnels, existants ou potentiels et les activités en cours visant à répondre directement aux besoins de la ME. Ces dernières seront dorénavant plus naturellement imputables aux démarches de l'OFRAME. Notons enfin que la validation des modèles scientifiques dans un contexte opérationnel peut s'avérer en retour très utile à la recherche fondamentale, car l'application fournit un test par l'observation supplémentaire. L'INSU a aussi décidé que la nouvelle situation de la ME en France nécessite une revue des activités impliquant les instruments et les services de recherche. L'OFRAME vise à dégager une stratégie pour l'évolution souhaitable de ses services d'observation, dans le cadre des services labellisés ANO6.

Les chercheurs du PNST ont fortement participé aux discussions avec les utilisateurs et les grands organismes au sein du Groupe de Travail Météorologie de l'Espace (GTME) animé par le CNES à l'instigation de la DGAC et à l'issue duquel certaines recommandations ont été établies. En parallèle de la création de l'OFRAME le Groupe de Coordination en Météorologie de l'Espace (GCME) du CNES fait suite au GTME. Cette action vise à offrir un lieu d'échange supplémentaire entre les responsables du CNES en ME, les instances nationales, industriels et chercheurs. Les rôles relatifs de l'OFRAME et du GCME sont schématisés dans la *Figure 23*.

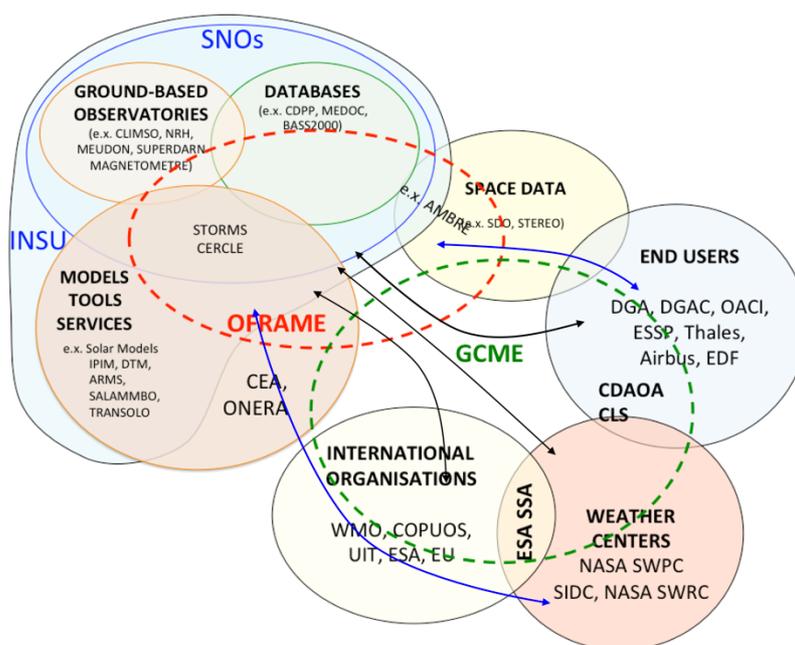


Figure 23. Schéma illustrant les activités de l'OFRAME et du groupe GCME du CNES. Le périmètre d'action de l'OFRAME, symbolisé par les tirets rouges, intègre les services d'observation de l'INSU, les modèles outils, jeux de données et services développés et gérés par les chercheurs/ingénieurs de l'INSU du CEA, de l'ONERA et du CNES. Les réunions du GCME qui ont lieu une ou deux fois par an incluent typiquement les représentants de différentes agences nationales (DGAC, DGA, CNES, Armée de l'Air) et internationales (ESA, H2020), ce périmètre d'influence est symbolisé en vert. Des échanges entre l'OFRAME et les utilisateurs peuvent soit se faire au travers du GCME (flèches noires) ou plus directement sans intermédiaire (flèches bleues) ce qui peut être dans certains cas plus efficace

Des informations supplémentaires sur l'OFRAME sont disponibles sur son site web : www.meteo-espace.fr.

Coopérations et projets ME en cours en France :

Depuis de nombreuses années la communauté PNST mène des coopérations avec des organismes intéressés par la météorologie de l'espace en dehors de la recherche. Ces coopérations constituent un soutien fondamental aux activités opérationnelles menées par ces organismes:

- le centre expérimental FEDOME de l'Armée de l'Air, alimenté par la fourniture de données en temps réel (optique, radio - Meudon, Pic du Midi, à Nançay – Observatoire de Paris, IRAP), des conseils et des formations du personnel;

- le service SIEVERT de surveillance du personnel navigant de l'aviation civile en France pour les radiations provenant du rayonnement cosmique, surveillance obligatoire par la réglementation européenne et la loi française: l'Observatoire de Paris (LESIA, pôle solaire) fournit depuis presque 20 ans à l'IRSN des données et des outils d'évaluation pour les doses de radiation;
- des indices solaires, développés par le LPC2E, pour les besoins opérationnels en ME [Lilensten et al. 2014] et plus particulièrement pour l'orbitographie: les atouts du flux radio à 30 cm comme indice solaire de l'UV (Dudok de Wit et al. 2014) pour l'amélioration des prévisions orbitographiques ont pu être démontrés (Dudok de Wit et al. 2017). Ces études ont été en partie réalisées dans le cadre d'un projet R&T CNES avec la société CLS (Collecte Localisation Satellites) qui opère depuis un site opérationnel avec divers indices radio: <http://spaceweather.cls.fr> (Yaya et al. 2017).

L'évolution du contexte international :

A la suite des travaux du GTME animé par le CNES, la France a décidé de contribuer au volet 3 du programme *Space Situational Awareness* (SSA) de l'ESA, qui fédère les activités de ME en Europe. Cette contribution passe par l'ONERA sur la thématique radiations et par les centres de données CDDP et MEDOC sur l'aspect fourniture de données et d'outils d'interprétation. Il est encore trop tôt de tirer des conclusions sur l'impact de ces nouveaux financements sur la dynamique en ME pour la communauté PNST.

Les travaux menés jusqu'à maintenant ont établi le PNST comme interlocuteur scientifique des organismes intéressés par la météorologie de l'espace en dehors de la recherche. Les demandes des utilisateurs se précisent. L'exemple le plus récent est l'aviation civile. Un consortium de Météo France et des sociétés ESSP et CLS, coordonné par la DGAC, a répondu à un AO de l'OACI pour un service mondial de météorologie de l'espace au bénéfice de l'aviation civile. Des chercheurs du PNST ont soutenu scientifiquement ce projet, par le conseil, la formation et la fourniture d'outils dans des domaines spécifiques. Le soutien par la communauté scientifique est reconnu par le consortium comme un atout essentiel de leur projet. En novembre 2018, l'OACI a désigné trois centres, dont un avec le consortium français dans le cadre d'une coopération internationale (Australie_Canada-France-Japon). Ce succès montre que la communauté PNST est un soutien crucial aux projets opérationnels que développent des organismes en dehors de la recherche.

L'intérêt des tutelles pour un investissement substantiel dans la ME est manifeste. L'exemple de l'aviation civile montre que des organismes extérieurs à la recherche demandent explicitement le soutien de la recherche pour leurs activités opérationnelles. Une préoccupation majeure est la déconnexion des activités SSA qui ont défini des cadres de développement sans la contribution de la communauté française. Cette situation peut entraîner des concurrences là où la coopération serait plus productive. Malgré ses forces scientifiques, la communauté française pourrait se trouver opposée à une communauté européenne déjà regroupée. La responsabilité de cette situation ne peut être attribuée à la communauté scientifique française, mais c'est un risque pour le développement de ses activités.

Animations et Formations en ME :

La communauté française est très active au niveau de l'animation scientifique de la ME au niveau européen et à l'interaction avec les utilisateurs (*European Space Weather Week, Journal of Space Weather and Space Climate*).

Des actions de formation incluant aussi des départements universitaires en sciences humaines ont été développées par les chercheurs de la discipline. Plusieurs groupes en France ont participé à l'organisation d'ateliers dédiés aux problèmes de la ME, une liste non exhaustive est donnée ici:

- Synergies nationales et internationales en météorologie de l'espace, Lyon SF2A, Juin 2016
- Synoptic Ground-Based solar observations for space weather, Nice, 19 et 20 octobre 2016
- "Assimilation de données" à Météo France, Toulouse, 8-9 Novembre 2016
- Nanosatellites et météorologie de l'espace, Grenoble 11-12 juin 2015
- Meteorology : from atmosphere to space, Paris-Meudon, 18-19 Juin 2015

La France, au travers d'OFRAME, a exprimé sa volonté d'organiser à l'avenir la *European Space Weather Week*.

Réflexion en cours sur le cadrage de l'ANO6:

La météorologie de l'espace est clairement un domaine en expansion. On peut néanmoins souligner que des activités dans ce domaine sont menées depuis longtemps par la communauté scientifique. Le service d'observation ANO6 comprend un volet surveillance du Soleil et du système Soleil-Terre qui est tout désigné pour développer des activités en météorologie de l'espace, et le fait déjà aujourd'hui. Le colloque de renouvellement du PNST à Sète, en novembre 2018, a exprimé le souhait de développer des activités météorologie de l'espace dans le cadre des ANO6, et d'y intégrer la modélisation numérique (*voir l'Annexe 3: Recommandations des groupes de travail organisés au colloque de renouvellement du PNST*). Disposer de modèles numériques de l'ensemble de la chaîne Soleil-Terre est un souhait des utilisateurs qui a trouvé son chemin dans les recommandations du groupe de travail météorologie de l'espace (GTME) animé par le CNES (*voir plus haut*). Ce souhait apparaît évidemment naïf aujourd'hui, mais il doit être une incitation pour la communauté scientifique de fédérer les efforts de modélisation dans les éléments de la chaîne Soleil-Terre avec l'objectif de développer des modèles globaux utilisables par des prévisionnistes. De tels développements se feront typiquement dans des services, et non pas avec une motivation de recherche. Il est dans l'intérêt de nos activités en météorologie de l'espace d'attirer de jeunes chercheurs experts en modélisation numérique.

Les actuels services d'observation ANO6 ont un potentiel tant pour le soutien sol des grands projets de la discipline que pour la météorologie de l'espace. Il est connu que beaucoup de ces services sont petits. La communauté est consciente qu'une fédération sera utile pour augmenter la qualité des prestations et la visibilité des services. Des premiers pas dans cette direction sont entrepris en 2019.

Mise à disposition de données, d'outils et modèles directement associés à la ME

La communauté PNST développe des outils mettant à disposition des données et des résultats de simulations permettant d'établir l'état actuel ou futur de la météorologie de l'espace du système Soleil-Terre. Nous faisons un bilan ici des outils en lignes déjà ou alors presque opérationnels.

Transplanet (IRAP): Le projet TRANSCAR à l'IRAP Online (<http://transplanet.irap.omp.eu/>) fournit des web-services pour interfacier les modèles IPIM et TRANSCAR au travers d'une interface web. Ce modèle dynamique présente d'énormes avantages par rapport à un modèle du type IRI (*International Reference Ionosphere*), puisqu'il prend en compte la dynamique et les transferts d'énergie qui sont fondamentaux dans l'équilibre de la structure ionosphérique (Marchaudon et al. 2018). La version actuellement accessible est une version bridée qui n'exploite pas toutes les capacités du modèle. Pour aller plus loin dans l'ouverture du modèle, une interface web sera développée, qui collectera les informations pertinentes sur l'électrodynamique (convection SuperDARN, précipitation OVATION,

courants parallèles AMPERE) et les mettra en forme pour être ingérées par le modèle et lancera au travers de TRANSCAR Online les simulations cohérentes avec les entrées. Le développement d'un prototype d'outil orienté ME assimilera des données pour contraindre le modèle ionosphérique. L'outil est développé au travers des SNOs CDPP et TRANSCAR labellisés ANO6.

Indices géomagnétiques (EOST): Les indices magnétiques font partie des outils les plus performants et les plus utilisés aujourd'hui, par exemple en entrée de modèles physiques ou empiriques avec pour but de décrire l'environnement spatial terrestre. Cependant, les indices planétaires actuels souffrent d'une résolution spatio-temporelle souvent trop faible pour assurer un suivi fin de l'activité magnétique terrestre. Chambodut et al. (2015) ont proposé de nouveaux indices planétaires avec une résolution de 15 minutes. Les motivations principales pour le développement de ces nouveaux indices étaient : un algorithme simple et facile à reproduire, une résolution temporelle plus fine et adaptable, un réseau de stations en zones subaurorales le plus dense possible et modifiable au cours du temps. Le but final est de pouvoir calculer ces indices en temps réel dans le cadre de la ME, de ne pas voir l'algorithme remis en cause ou la série temporelle perturbée par l'ajout/disparition d'une station, de permettre à l'utilisateur d'adapter les résolutions temporelle et spatiale à ses besoins. L'outil est développé au travers du SNO ISGI labellisé ANO6.

CERCLE: Surveillance du rayonnement cosmique (Observatoire de Paris, LESIA): Ce service gère l'exploitation scientifique des moniteurs à neutrons, hébergés aux Iles Kerguelen et à Terre Adélie par l'Institut Polaire Français Paul-Emile Victor (IPEV). Il contribue à la quantification des radiations pour SIEVERT et fournit les outils et données à la société CLS pour leur activité opérationnelle sur les doses de radiation, dans le cadre du service météorologie de l'espace de l'OACI. L'outil est développé au travers du SNO CERCLE labellisé ANO6 et sera disponible sur le web

STORMS : Prévisions du vent solaire (IRAP): Un autre modèle de vent solaire, appelé MULTI-VP, a été développé par l'IRAP au travers de financements du projet européen HELCATS. Il répond aux contraintes opérationnelles (Pinto & Rouillard 2017). Ce modèle est issu de la recherche fondamentale (Pinto et al. 2009, Grappin et al. 2010). Il a ensuite été déployé pour la ME au travers du projet SWIFT grâce à un financement CNES SHM, le premier projet sélectionné sur un appel dédié SHM- 'météorologie de l'espace'. Le modèle MULTI-VP de vent issu de la recherche fondamentale a été adapté pour tourner sur un champ magnétique 3-D réaliste de la couronne. L'outil est développé au travers du SNO STORMS labellisé ANO6. L'outil est disponible à : windcast.irap.omp.eu .

Prévisions des éruptions solaires (LESIA/IAS) : Le pôle solaire du LESIA a participé à la mise en service d'un système automatique de prévisions des éruptions. Ce système, installé sur les serveurs de MEDOC, s'appuie d'une part sur l'extraction automatique d'observations des propriétés physiques des régions actives solaires. Chaque centre actif est ainsi caractérisé par plus de 175 paramètres. Le cœur du système de prévision de FLARECAST repose ensuite sur l'état de l'art en exploration de données, avec près d'une dizaine d'algorithmes d'intelligence artificielle (supervisés, non-supervisés, réseaux-neuronaux) permettant de faire des prédictions binaires ou statistiques du déclenchement d'une éruption solaire d'une force donnée dans une période donnée suivant l'instant d'analyse.

Meteospace : Nouvelle station automatique d'imagerie solaire (OCA/LESIA/LUNA : surveillance H-alpha développée en partenariat avec le LESIA et LUNA (Secteur privé) avec entre autre un financement DGA. Les produits seront des images H-alpha ainsi que des séquences en acquisition rapide délivrées en temps réel. Le but est la surveillance de phénomènes transitoires et rapides à la source des événements éruptifs dans la chromosphère (déstabilisation de filaments, ondes de Moreton) et susceptibles d'entraîner des perturbations de l'environnement spatial. L'abri de l'instrument à été construit à Calern en 2017, il sera complètement automatisé en 2018. La livraison de l'instrument sur le site de Calern est prévue pour le printemps 2019.

Outils mis à disposition au travers du portail Space Situational Awareness de l'ESA:

L'outil AMDA ainsi que le Propagation Tool développés par le CDPP et STORMS ont été mis à disposition au travers du site SSA de l'ESA (<http://swe.ssa.esa.int/heliospheric-weather>) dédié aux outils utiles à la météorologie de l'espace. Le CDPP fait parti du centre Heliospheric Services.

Investissement de la communauté dans des projets de recherche en ME:

La communauté PNST s'est fortement impliquée dans les projets de recherche en météorologie de l'espace à l'échelle nationale et internationale.

FLARECAST (H2020, 2015-2018, LESIA, IAS): A travers le projet du programme Européen H2020 FLARECAST (<http://flarecast.eu/>), la problématique de la prévision du déclenchement des éruptions solaires a vu d'importantes avancées.

HELCATS (FP7, 2014-2017, IRAP): Le projet HELCATS a développé de nouveaux catalogues d'éjections coronales de masse (CMEs) et de régions d'interaction en corotation (CIRs) issus de l'analyse des images coronographiques et héliographiques de STEREO. Le projet a aussi mis en place un nouveau modèle de vent solaire qui tourne en temps réel et permet de prévoir l'état du vent solaire à la Terre.

HESPERIA (H2020, 2015-2018, LESIA): Ce projet H2020 visait à mieux comprendre l'origine des particules solaires de haute énergie (SEPs) et leur lien avec les signatures électromagnétiques (gamma, rayons X, radio) lors d'éruptions solaires. Il a aussi développé de nouveaux outils de prévision des SEPs. Le projet a conduit à un livre en accès ouvert "Solar Particle Radiation Storms-Forecasting and Analysis" (éds. Malandraki et Crosby, Springer ASSL 444, 2018; <https://www.springer.com/us/book/9783319600505>).

SOLARCAST (ERC Proof of Concept sur fin 2014- début 2017, CEA): Projet visant à prévoir l'activité solaire sur les échelles du cycle solaire (11 ans), le vent solaire et les éruptions solaires. Projet en partenariat entre le CEA, IPAG, LESIA.

ORME (ANR/ASTRID: 2015-2017, Observatoire de Paris (LESIA, US Nançay), Université d'Orléans (PRISME): Observations Radio astronomiques pour la Météorologie de l'espace): recherches sur l'émission radio solaire en tant qu'indicateur d'événements en ME et la reconnaissance automatique de structures dans les spectres dynamiques des sursauts radio.

Réseau COST TOSCA (2011-2015, LPC2E): L'étude des interactions Soleil-climat a bénéficié du fort réseautage engendré par le projet COST (*Cooperation in Science and Technology*) ES1005 (TOSCA, 2011-2015), dont le LPC2E était coordinateur. Ce réseau a réuni une centaine de scientifiques de plusieurs communautés et a donné lieu à des actions politiques (white paper, montage d'un des axes scientifiques du SCOSTEP), scientifiques (17 ateliers organisés) et pédagogiques (2 écoles d'été, nombreux échanges de jeunes scientifiques). Son principal livrable est un livre de vulgarisation sur les influences de la variabilité solaire sur le climat (Lilensten et al. 2015).

Travaux de recherche fondamentale étroitement liée à la ME:

Les travaux de recherche en France visant un jour à prévoir les perturbations de l'environnement terrestre induites par l'activité solaire couvrent tous les sous-systèmes du couplage très complexe entre l'atmosphère solaire et la Terre. L'expertise française est donc très large comme illustrée dans la *Figure 23* issue de l'article par Rouillard et al. (2018) faisant un bilan des atouts nationaux. De nombreux atouts ont vu le jour entre 2014 et 2018 que nous abordons ici.

Processus au Soleil

Intérieur du Soleil: prévisions du cycle de 11 ans (CEA): Le projet SolarCast mené par le CEA a eu pour but d'améliorer notre capacité à anticiper et prévoir le cycle de 11 ans du Soleil, son vent et son intense activité magnétique (éruptions, et à terme éjections coronales de masse) associée. La démarche repose sur l'utilisation de modèles physiques pour décrire les phénomènes éruptifs du cycle solaire sur quelques années. Des algorithmes d'assimilation variationnelle 4D-var reposant sur des modèles physiques performants nous permettent de faire aussi bien de l'analyse post-événement que de la prévision. Le projet SolarCast s'est partagé en maintenant trois sous projets, à partir d'un modèle de la dynamo solaire (Brun 2007, Jouve et al. 2011, Hung et al. 2015, 2017). L'algorithme a été validé sur les cycles 22 et 23 et un travail est en cours pour intégrer les cycles 24 et 25 avec des données réelles.

L'irradiance solaire et ses variations (LPC2E): Les travaux du LPC2E au sein du projet FP7 EUCLID ont apporté de nouvelles informations sur l'impact de l'irradiance solaire en climatologie de l'espace et de l'atmosphère terrestre. Ceci a débouché sur une nouvelle méthodologie pour la fusion de données issues de différents capteurs de l'irradiance solaire (Dudok de Wit et al. 2017b) qui sert actuellement de référence pour la reconstruction officielle de l'irradiance solaire totale, mettant ainsi fin à des années de désaccord. Ils ont aussi mis en évidence le rôle de la réponse convoluée dans le temps de l'irradiance à l'émergence de flux magnétique (Dudok de Wit et al. 2018). De nouveaux modèles simples fournissent le profil d'irradiance de la raie Lyman-alpha de 1947 à nos jours (Kretzschmar et al. 2018).

Un autre volet concerne la nouvelle reconstruction du nombre de taches solaires, qui se fait dans le cadre d'un groupe à l'ISSI et d'un projet belge avec le Belspo. Nous avons estimé pour la première fois les incertitudes sur ces données (Dudok de Wit et al. 2016). Cela conduira à la publication d'une nouvelle reconstruction officielle de ce nombre de taches.

Ces indices sont très utilisés pour caractériser l'activité solaire et les prévisions à long terme de cette activité. En raison de l'importance stratégique de ces diverses observations d'irradiance pour l'étude du lien Soleil-climat, un groupe ISSI coordonné par le LPC2E a pris le relais du projet SOLID pour fournir la contribution au CMIP6 (*Climate Model Intercomparison Project*) qui alimentera le prochain rapport du GIEC (Matthes et al. 2016). Cette équipe a pour la première fois réussi à assembler en une seule base de données homogène les séries temporelles avec les principaux forçages solaires (irradiance et particules) de 1850 à aujourd'hui.

Emissions électromagnétiques solaires (LATMOS/LPC2E): La communauté française est aussi très impliquée dans la modélisation des émissions solaires impactant l'ionosphère terrestre. L'équipe du LATMOS étudie la nature et la variabilité des sources à l'origine des émissions solaires (coronographie haute résolution, programmes HiRISE et PROBA-3), la prévision des événements extrêmes, ou encore la variabilité solaire ultraviolette et son influence sur le climat de la Terre. Le ré-étalonnage en vol de l'instrument SOLSPEC de la mission SOLAR (2008-2017) a abouti à d'importants résultats sur la variabilité et les spectres de référence qui ont pu être obtenus (Meftah et al. 2016, 2017, 2018). SOLAR SPECTrometer (SOLSPEC) est un des instruments de la charge utile SOLAR à bord du module COLOMBUS.

Déclenchement des éruptions solaires (LESIA/IAS): A travers le projet du programme Européen H2020 FLARECAST (<http://flarecast.eu/>), la problématique de la prévision du déclenchement des éruptions solaires a vu d'importantes avancées. Le cadre du projet FLARECAST a permis des recherches fondamentales sur la prévision physique du déclenchement des éruptions. Guennou et al. (2017) ont ainsi analysé des simulations numériques paramétriques de formation des régions actives solaires.

Ces travaux ont mis en avant l'importance de la ligne d'inversion entre polarités magnétiques. Ils ont aussi permis de tester la sensibilité des différentes quantités physiques caractérisant les régions actives aux bruit et biais présents dans les données d'observations et au choix des paramètres physiques et des algorithmes d'extraction utilisés dans des systèmes comme FLARECAST. Enfin FLARECAST a conduit à la découverte d'un marqueur de l'éruptivité avec un très fort potentiel prédictif. Ce marqueur est une quantité physique basée sur l'analyse de l'hélicité magnétique du champ magnétique coronal (Pariat et al. 2017, Zuccarello et al. 2018).

Déclenchement des éjections de masse (CPHT/Polytechnique): Exploitant le champ magnétique mesuré à la surface solaire par la mission *Hinode* pour modéliser la formation et l'évolution d'une CME, et incluant aussi les effets importants du champ de vitesse du plasma photosphérique qui induit en permanence de fortes modifications de la couronne, Amari et al. (2014) ont pu reproduire l'éruption d'une CME en très bon accord avec les observations ou montrer pourquoi, en dépit de fortes perturbations induites par l'éruption de champs magnétiques, certaines éruptions restent confinées dans la couronne solaire par le champ magnétique ambiant (Amari et al. 2018). Ces travaux de recherche en amont offrent ainsi de nouvelles perspectives extrêmement intéressantes pour la prévision des éruptions solaires.

Enfin des travaux sont en cours au CEA dans le cadre du projet FlarePredict pour anticiper les éruptions solaires à partir d'un modèle d'organisation auto-critique type tas de sable pour les éruptions (Strugarek & Charbonneau 2014a,b, Strugarek et al. 2017).

Modélisation du vent solaire du Soleil à la Terre (IRAP): Le couplage de modèles développés pour différentes régions de l'Héliosphère est un prérequis pour leur application en météorologie de l'espace, tout autant que la rapidité du calcul sans laquelle des applications temps réel ne sont pas envisageables. Le modèle de vent solaire MULTI-VP, décrit (dans la section "Couplages"), est interfacé avec le modèle de propagation dans l'espace interplanétaire déployé récemment au CDPP (modèle MHD 1D, Tao et al. 2005). Ce modèle permet de calculer très rapidement les temps de propagation des écoulements du vent solaire. Il permet aussi de modéliser la compression le long de l'axe Soleil-Terre des régions d'interaction en corotation. Ce modèle de vent sera couplé à la limite supérieure du modèle MULTI-VP (~30 rayons solaires) et permet de prévoir les conditions du vent solaire près de la Terre ou des sondes spatiales qui mesurent les propriétés du vent *in-situ* (Pinto et al. 2018). Les prévisions sont mises à disposition au travers du site windcast.irap.omp.eu

Impact des perturbations d'origine solaire sur l'environnement spatial de la Terre

Etude comparative des effets des CIRs et CMEs sur la magnétosphère (ONERA): Dans l'optique de concevoir un prototype de service de météo de l'espace consacré aux régions d'interaction en corotation (CIRs "Corotating Interaction Regions") qui affectent l'environnement spatial terrestre, deux axes de recherches ont été suivis par l'ONERA: l'analyse de la géo-efficacité des structures du vent solaire (CIR et ICME) du point de vue des ceintures de radiation (travaux relatés plus haut, section Couplage entre les différentes enveloppes de plasma) et le développement d'un réseau de neurones capable de prédire l'indice d'activité Am à partir des paramètres du vent solaire.

Trois modèles de réseaux de neurones ont été considérés: le réseau de neurones de rétro-propagation (perceptron), le réseau neuronal à retard de temps et le réseau neuronal autorégressif non linéaire avec des entrées exogènes appelé aussi NARX. L'apprentissage des réseaux de neurones a été réalisé à partir de la base de données OMNI de la NASA couvrant la période 1995-2014. La performance de ces réseaux a été analysée en termes d'erreur globale au sens des moindres carrés, de coefficients de corrélation et aussi en termes de probabilité de détection et de fausse alarme. La prévision à une heure des indices magnétiques, en particulier Am, d'après les mesures du vent

solaire, montre une bonne performance. Toutefois le NARX se détache avec une probabilité de détection de 0.945 et de fausse alarme de 0.054.

Prévision du temps de parcours des CMEs et particules du Soleil à la Terre (LESIA): Les manifestations observationnelles d'une éruption en cours peuvent être utilisées pour prévoir si, quand et avec quelle intensité la Terre pourrait être affectée. Salas-Matamoros et al. (2015, 2017) ont montré que la vitesse d'une CME dans la couronne et le temps de parcours interplanétaire peuvent être estimés à partir de la fluence des sursauts X et micro-ondes associés. Pour la prévision des événements solaires à particules, Zucca et al. (2017) ont montré l'utilité du profil temporel du sursaut micro-ondes dans le modèle UMASEP de l'Université de Malaga (Núñez et al. 2017). Ces travaux soulignent l'utilité des observations de surveillance en rayons X et ondes radio pour la météorologie de l'espace (Klein et al. 2018). Les sursauts radio solaires peuvent à l'occasion eux-mêmes être source de perturbations technologiques. Marqué et al. (2018) montrent ce fait pour un grand sursaut solaire ayant perturbé des radars de contrôle aérien dans certains pays européens en 2015.

Perturbation de l'ionosphère

Caractérisation des variations régulières de l'ionosphère et des perturbations (LPP): Pour analyser l'impact des événements solaires sur l'environnement terrestre, il est nécessaire de connaître les variations régulières de ce dernier. En particulier, les variations régulières de l'ionosphère et du champ magnétique terrestre au Vietnam et en Afrique ont pu être mesurées grâce à des mesures d'ionosondes (Tanoh et al. 2015), de récepteurs GPS (Le Huy et al. 2014, Shimeis et al. 2014) et de magnétomètres (Anad et al. 2016). A partir de cette caractérisation des variations régulières, l'impact des éjections coronales de masse et des vents solaires rapides sur les variations de contenu total en électrons et/ou sur les variations du champ magnétique terrestre a pu être mis en évidence (Fathy et al. 2014, Shimeis et al. 2015, Azzouzi et al. 2015, 2016, Nava et al. 2016, Migoya-Orue et al. 2016, Rodriguez-Zuluaga et al. 2016,, Zaourar et al. 2017). Rappelons que l'ionosphère affecte les signaux GNSS (*Global Navigation Satellite System*) en provoquant un retard sur l'arrivée du signal. Ce retard permet d'évaluer le nombre d'électrons que le signal émis par le satellite a rencontré entre le satellite et la terre. L'ionosphère affecte aussi le signal GNSS en provoquant des scintillations en phase et en amplitude pouvant conduire à la perte du signal. Les scintillations du signal GPS ont été caractérisées au Vietnam (Tran Thi et al. 2017) et pour la première fois en Rép Dém. du Congo. Enfin, les champs électriques induits dans le sol par les perturbations solaires peuvent causer des dommages dans les transformateurs et leur mesure locale est importante pour pouvoir estimer les risques (Dolumbia et al. 2017). Le LPP, au travers de C. Amory-Mazaudier, s'investit très fortement dans ces collaborations qui reposent sur des équipes locales actives au-delà des publications avec co-auteurs français énumérés ici.

Caractérisation de l'ionosphère (IPAG): Des travaux encore très en amont de l'opérabilité sur la polarisation aurorale vont permettre de caractériser les variations du champ magnétique sous l'activité solaire, et mieux contraindre les variations de la thermosphère entre 200 et 250 km d'altitude. La polarisation du rayonnement auroral a été modélisée avec un code de transport cinétique augmenté d'un module de calcul résolvant les équations de physique atomique nécessaires (Lilensten et al. 2015), ce qui a permis de calculer pour la première fois la fonction de phase qui décrit l'angle d'émission d'un électron après collision avec l'oxygène atomique.

L'angle de polarisation (AoLP) est aligné sur le champ magnétique lorsque l'ionosphère est calme, et en part dès qu'il y a de l'activité géomagnétique (Lilensten et al. 2016). Ce résultat permet de progresser dans l'utilisation de la polarisation aurorale à des fins de météorologie de l'espace (*Figure 23*). Enfin, la polarisation de la raie bleue de l'azote moléculaire, émise vers 85 km d'altitude, a été observée (Barthélemy et al. 2018). Cette observation, à partir d'un instrument partiellement financée

sur crédits PNST, doit être confirmée. Elle pourrait donner accès à des paramètres de l'ionosphère et son couplage avec la thermosphère en région E.

Outil de recherche automatisée des données in situ (LPP) : Une grande quantité de données a été amassée au cours de nombreuses années de mesures in situ sur les événements et processus plasmas se déroulant dans le milieu interplanétaire et la magnétosphère terrestre. Le projet SciQLOP a été développé pour permettre une visualisation rapide de masses de données. Un travail de thèse a été démarré pour étudier le couplage du vent solaire et de la magnétosphère terrestre dans une approche statistique via l'utilisation d'algorithmes d'apprentissage statistique. Les premiers résultats permettent de détecter les éjections coronales de masse interplanétaires (ICME) à L1 avec une robustesse bien plus grande que les méthodes précédentes. Ces détections se font sans a priori empirique sur les structures, et permettent l'établissement de catalogues de manière reproductible.

Perspectives

Une grande partie des activités en ME du PNST se réalisera par l'OFRAME. Il n'est néanmoins pas envisageable d'établir une activité opérationnelle. Le PNST continuera à soutenir des activités opérationnelles des acteurs en dehors de la recherche par son expertise, ses données et ses outils d'interprétation. L'OFRAME permettra de répondre de manière visible, efficace et structurée aux sollicitations du monde académique, aux organismes publiques nationaux et internationaux et aux acteurs pour lesquels la ME représente aujourd'hui un enjeu technique, scientifique et économique.

Vers de nouveaux services en ME:

Au travers d'OFRAME de nombreuses activités visant à mettre à disposition en temps réel les observations, modèles et outils utiles pour la ME vont se poursuivre. L'OFRAME va aussi poursuivre ses activités visant à identifier les nouveaux besoins des utilisateurs de comme par exemple la caractérisation des problèmes associés à la ME : les effets de radiations ou de freinage sur les satellites, les systèmes de positionnement, les transmissions HF ou les réseaux électriques.

L'OFRAME va continuer à mettre à disposition des prévisions en ME sans avoir vocation à faire de l'opérationnel. Le but est dans un premier temps de tester la pertinence des outils, modèles et données issues de la recherche dans un 'contexte opérationnel', notamment au travers du site web de l'OFRAME.

Le programme de financement ESA-SSA/GSTP ouvert récemment à la communauté scientifique en France vise à coupler les modèles numériques du système Soleil-Terre développés en Europe au travers du portail web du Centre Européen de Modélisation en Météorologie de l'Espace (VSWMC, <https://esa-vswwmc.eu/>). A ce stade seul trois laboratoires (IRAP, CPHT-X, CEA) seront impliqués en France dès 2019 et nous souhaitons que d'autres laboratoires français puissent contribuer au VSWMC.

A partir des rencontres et des études réalisées ces dernières années nous avons déjà identifié des outils qui peuvent être apportés par la communauté scientifique. De nombreux projets en commun avec les industriels (Thalès Alenia Space, ESSP, CLS) et les instances nationales (DGAC, OACI, DGA) sont déjà en cours et plusieurs outils issus de la recherche fondamentale vont, par ce biais, transiter vers le domaine applicatif très prochainement. Nous avons besoin d'autres financements dédiés à la ME et répondrons aux appels d'offre du CNES (SHM)/ITT), de l'ANR, de l'ESA et des programmes Européens. Ces financements sont essentiels pour poursuivre la structuration de nos activités en ME au cours des prochaines années.

Les services d'observation de l'INSU sont un atout pour les activités en ME en France. L'ANO 6 est en partie dédiée à la surveillance de l'activité solaire dans le système Soleil-Terre. L'OFROME a vocation à aider à orienter les services vers la ME.

Vers des moyens d'observations opérationnels dans l'espace: L4/L5 et micro/nano-satellites

Des progrès significatifs en ME ne pourront être possibles que si la couverture spatio-temporelle des observations du système Soleil-Terre est grandement améliorée. En effet, nous manquons de nombreuses observations critiques qui permettraient de mieux contraindre nos modèles et ainsi fournir de meilleures prévisions en ME. Plusieurs pistes sont donc étudiées pour compléter les mesures déjà disponibles. Nous retiendrons en particulier la mise en place d'un système dédié à l'observation en continu des vents et éjections de masse solaires le long de l'axe Soleil-Terre depuis plusieurs points stratégiques de l'héliosphère.

L'ESA étudie dans le cadre du programme SSA la mise en place d'un observatoire en aval de l'orbite terrestre au point de Lagrange L5 (mission nommée 'Lagrange'). La pertinence d'une telle mission pour suivre les éjections coronales de masse de faibles et moyennes amplitudes depuis le Soleil jusqu'à la Terre a déjà été démontrée par les sondes STEREO. En dehors de cet aspect opérationnel, une mission en L5 revêt un intérêt manifeste dans la recherche en amont pour la météorologie de l'espace: un magnétographe solaire placé en L5, en combinaison avec un magnétographe en L1, donnerait deux points de vue pour mesurer le champ magnétique photosphérique des régions actives, ce qui permettrait de lever une ambiguïté sur l'orientation du vecteur. D'autre part, une sonde en L5 permettrait à la fois de voir les CME dans le plan du ciel et de mesurer in situ le gros des particules de haute énergie accélérées autour de la CME. En effet, le point L5 est magnétiquement connecté, par la spirale de Parker, au voisinage du méridien central du Soleil vu depuis la Terre, c'est donc une localisation particulièrement favorable pour observer les particules associées à la CME. Troisième point, on pourrait mesurer en L1 in situ des paramètres de la CME qu'on observe en imagerie depuis L5. Ces trois atouts n'ont été exploités que très partiellement par les sondes STEREO. Elles ne portaient pas de magnétographe solaire. D'autre part elles ont passé très peu de temps, pendant le début de la montée du cycle d'activité, et ont de ce fait observé très peu de CME dans la configuration qu'aurait une paire L5-L1. Comme pour le reste du programme *Space Situational Awareness*, l'absence de la France avant 2018 l'a empêchée de peser sur la définition scientifique et opérationnelle d'une telle mission. La communauté scientifique française n'est de ce fait pas moteur. Nous soulignons néanmoins l'expertise des laboratoires français en instrumentation spatiale, dans l'archivage et la diffusion des données, dans l'interprétation des processus physiques et aussi en instrumentation sol complémentaire. Si l'ESA décide la mission L5, il sera dommageable pour le rôle de la France dans le paysage météorologie de l'espace européen de rester en dehors de la réalisation et de l'exploitation de la mission.

Les micro/nano satellites dans l'environnement terrestre proche offrent aussi un potentiel de mesure prometteur pour le futur de la ME. Plusieurs études en cours menées par la communauté montrent que des essais de microsats ou de nanosats déployés dans l'ionosphère (mesure des courants et précipitations de particules) et/ou dans la magnétosphère (par ex., mesures du champ magnétique, des flux de particules) apporteraient des mesures critiques en augmentant considérablement la couverture spatio-temporelle pour contraindre nos modèles numériques et améliorer nos prévisions. Ces technologies nécessitent néanmoins des développements importants, à travers l'étude de nouvelles technologies et la miniaturisation de l'instrumentation embarquée ou le maintien de vols en formation de tels essais. Les difficultés rencontrées pour la mise en place d'accéléromètres mesurant les mouvements de la thermosphère témoignent des défis techniques typiquement rencontrés. Ce domaine est en plein essor avec un foisonnement d'idées techniques et de nombreuses actions en cours en France impliquant étudiants et chercheurs.

Les projets de l'ESA en ME vont dans ce sens avec le projet Distributed SWE Sensor System (D3S) qui vise à exploiter une instrumentation miniaturisée sur des plateformes hôtes (type charge-utile d'opportunité) en plus d'une mission de petits satellites dédiée à la météorologie de l'espace. La communauté SHM/PNST a développé plusieurs instruments miniaturisés capables d'équiper de telles missions (comme les instruments particules AMBRE, IDEE, et ICARE permettant de couvrir la quasi-totalité du spectre en énergie).

Afin d'exploiter les données existantes et futures pour mieux contraindre nos prévisions en ME, la communauté scientifique va poursuivre ses efforts en assimilation des données au travers de nouveaux projets, souvent en commun avec d'autres disciplines qui exploitent ces techniques depuis plusieurs décennies. L'intelligence artificielle (IA) prend aussi sa place en ME au niveau international et plusieurs équipes scientifiques ont débuté des travaux exploitant cette approche. Là où les sous-systèmes des relations Soleil-Terre sont difficilement modélisables car trop complexes ou mal observés à certaines échelles spatio-temporelles, l'IA peut apporter des solutions et combler nos lacunes.

En résumé la communauté scientifique PNST/SHM, en partenariat avec l'industrie et les instances nationales, va continuer à s'investir en ME pour améliorer les prévisions et répondre aux besoins des utilisateurs. Ces prochaines années seront dédiées au déploiement de nouvelles technologies pour mieux observer le système Soleil-Terre, à l'exploitation de nouveaux modèles numériques plus performants ainsi que de nouvelles techniques d'intégration, d'exploitation et de gestion des données. En partenariat avec l'OFRAME, la communauté va aussi poursuivre ses actions de formation (écoles d'été, ateliers et formations en entreprises) des étudiants et des ingénieurs aux enjeux et techniques de modélisation et d'observations utilisées en ME. L'OFRAME et la communauté SHM vise aussi à candidater de nouveau en 2020 pour accueillir la conférence *European Space Weather Week* (ESSW) reconnue comme une des deux grandes conférences dans ce domaine au niveau mondial.

L'implication de la France dans le prochain volet 4 ESA-SSA est donc absolument vital pour la poursuite de toute la dynamique mise en place en France ces dernières années. Afin de répondre aux besoins sociétaux exprimés par l'industrie et les instances nationales nous recommandons donc un investissement conséquent visant à améliorer les observations et la modélisation du système Soleil-Terre et la modélisation de ce milieu au travers des programmes existants, en particulier le programme ESA-SSA.

Moyens, services et outils

Instruments au sol

Contexte

La France opère des instruments au sol pour l'observation du Soleil (lumière visible, ondes radio, particules), de l'ionosphère et pour la mesure du champ magnétique terrestre. A côté de quelques grands instruments à audience internationale, de petits instruments, souvent des instruments d'équipe, alimentent des recherches originales. Beaucoup de ces instruments jouent un rôle en météorologie de l'espace, au travers de produits à valeur ajoutée fournies à de tels services et en alimentant des études post-événement intéressant la météorologie de l'espace. Ces instruments restent néanmoins des outils de recherche. Ils font partie d'un "soutien sol" aux grands projets spatiaux dans la discipline qui est un facteur essentiel du retour scientifique: la plupart des instruments sol fournit des données non accessibles depuis l'espace, que ce soit pour le domaine d'observation (le Soleil en lumière visible ou dans une partie du spectre radio) ou la gamme d'énergie des particules. Nous subissons depuis plusieurs années un manque croissant de personnel scientifique et technique autour des instruments sol. Le manque de recrutements continuera dans les années à venir à faire perdre des compétences à la communauté française et nous rendra dans certains domaines incapables à participer de façon significative à des projets internationaux.

Instruments à audience internationale

THEMIS

Ce télescope, ouvert à la communauté solaire depuis 1999, a pour objectif l'observation du magnétisme solaire à haute résolution spatiale et haute sensibilité polarimétrique. Il est situé sur le site de l'institut d'Astrophysique des Canaries à l'observatoire du Teide (Tenerife). En 2008 le télescope est passé du statut de TGE à celui d'une infrastructure gérée par l'INSU. Depuis 2008, THEMIS s'est engagé dans une collaboration avec la communauté solaire européenne dans le cadre du projet de grand télescope solaire européen EST. Des financements européens ont été obtenus, d'abord pour une étude de concept de EST (2008- 2011), puis pour un réseau I3, intitulé SolarNet (2013-2017), qui se poursuivra par un autre I3, intitulé SolarNet2 (2019-2022).

Dans le cadre de la préparation à EST, une jouvence profonde de l'instrument à été réalisée, sur financements européens (SolarNet : 620 k€, SolarNet2 : 200 k€), avec l'aide de la DT de l'INSU et en collaboration avec le CRAL. Ces travaux ont été menés par une équipe technique très réduite au sein de la société THEMIS qui se compose actuellement de six personnes (un scientifique - le Directeur, trois ingénieurs, un technicien et un administrateur).

Les observations à THEMIS ont donné lieu à 127 publications dans des revues de rang A jusqu'en 2016 (arrêt momentané des campagnes d'observation fin 2015, voir plus loin). La liste complète est disponible à SAO/NASA ADS Themis_bg library

Bilan 2014-2019:

Deux campagnes d'observations ont eu lieu en 2014 et 2015. Le CS du PNST a financé les missions d'observations des observateurs français.

Depuis fin 2015 :

- Jouvence profonde de l'instrument, installation d'une optique adaptative (OA) solaire, d'un tip-tilt planétaire pouvant être transformé en OA planétaire, refonte des systèmes d'analyse polarimétrique et de balayage du champ, ainsi que d'autres transformations techniques dérivant des options précédentes.
- Projet en cours de transformation de la structure UPS3718, qui concerne uniquement l'équipe et l'instrument THEMIS, en une Unité Mixte Internationale dont le partenaire étranger sera l'Institut d'Astrophysique des Canaries. Le périmètre scientifique de la nouvelle unité englobe de la physique solaire (programme typique de THEMIS, plus éventuellement une composante d'astérosismologie), de la physique des hautes énergies dans le cadre de l'installation de CTA Nord sur le site de La Palma, et une composante de développement instrumental de détecteurs pour des mesures de du fond diffus cosmologique polarisé. Les participants au projet « UMI Franco Canarienne » côté français sont le CNRS/INSU, le CNRS/IN2P3 et le CEA.
- L'ancienne société privée d'exploitation du télescope THEMIS a été transformée en société filiale à 100% du CNRS en 2018 qui est contrôlée exclusivement par le CNRS/INSU.

Prospective

THEMIS rénové est ouvert à la communauté en 2019 pour les premières observations sans polarimétrie. Un comité scientifique des programmes sera mis en place ultérieurement. L'ensemble du train optique entre les miroirs M1 et F2 a été remplacé (incluant le miroir secondaire), permettant de développer un nouveau système d'analyse polarimétrique ("calibration free"), sans aucune limitation de champ (le champ nominal est toujours de 120'' carré). L'ensemble des transformations a un bilan photonique positif avec en moyenne deux fois plus de lumière au F2 que dans l'ancienne version, et huit fois plus en dessous de 450 nm. La bande passante nominale jusqu'au F2 est maintenant de 400-1100 nm. La résolution spatiale et spectrale sera de au moins 0.1''/px spatial et au moins 0.0005 nm/px spectral.

THEMIS rénové est ouvert à des propositions de développement de nouveaux modes d'observations ou à la venue d'instruments visiteurs. Un « visitor port » détourne le foyer F2 du spectrographe et le met sur une table d'instrumentation optique pour visiteurs.

La bibliothèque de l'ensemble du projet est disponible à l'adresse http://161.72.34.10/dokuwiki/doku.php?id=proj:ao_project_library

Des projets de développements techniques ultérieurs concerneront certainement l'OA :

1. Optique adaptative de 2eme génération : Diminuer l'erreur de fitting du système avec un miroir contenant plus d'actuateurs sur la même pupille (THEMIS + CRAL)
2. Utilisation de l'OA actuelle pour développer de nouveaux modes de fonction de transfert de commande (CRAL)
3. Développement d'une OA planétaire pour des observations diurnes/ nocturnes sur Mercure, Jupiter, Io ... (LATMOS + THEMIS)

Message

Le PNST souligne l'engagement remarquable de l'équipe THEMIS qui a mené ces transformations profondes de l'ensemble instrumental du télescope. Un certain nombre de solutions techniques originales et innovantes ont été développées pour rendre compatible la correction par l'OA avec la précision polarimétrique. Un savoir-faire précieux dans la perspective du développement de EST a été acquis.

Prospective EST

C'est un projet européen de grand télescope solaire de 4m équipé d'une optique adaptative performante. Il est dédié à l'étude du magnétisme solaire depuis les couches profondes de la photosphère jusqu'à la haute chromosphère. L'instrumentation de pointe permettra des études à très hautes résolutions spatiale et temporelle. En particulier la spectro-polarimétrie intégrale de champ prévue a pour objectif une résolution spatiale de l'ordre de 10 km sur le Soleil, permettant d'observer les processus magnétiques aux échelles où ils se produisent. Ce projet a été inscrit sur la liste ESFRI des grandes priorités européennes par la commission européenne en mai 2016. Un consortium dénommé PRE-EST constitué de 23 instituts issus de 16 pays européens a été établi en avril 2016 sous la coordination de l'Institut d'Astrophysique des Canaries. La France y participe par l'Université Paul-Sabatier à Toulouse (IRAP). Le but de PRE_EST est de fournir au consortium international EST et aux agences nationales les informations nécessaires, tant sur le plan de l'organisation que sur le plan technique, pour leur prise de décision en vue de la réalisation du projet. Il conduira les études détaillées des éléments clés de EST en vue de leur définition précise et de leur validation. Ces études se poursuivront jusqu'en 2021 (pour un budget estimé à 15 M€). La construction du télescope est prévue entre 2022 et 2028 (pour un budget estimé au total à 180 M€), et l'ouverture aux observations en 2029. Le budget annuel en opération est estimé à 12 M€.

La France a un membre dans le *Science Advisory Group* (SAG), mais n'est pas engagée financièrement dans EST. Il est incontestable que la France possède, grâce à THEMIS, un savoir-faire significatif pour contribuer à l'instrumentation, mais avec un très petit nombre de personnes. Le savoir-faire technique et scientifique acquis sur THEMIS pourrait être valorisé par une participation française à des développements instrumentaux spécifiques pour EST dans le cadre de l'UMI franco-espagnole.

Observations radio sol à la station de radioastronomie de Nançay

La station de Nançay possède un ensemble unique au monde d'instruments observant le Soleil en ondes radio décimétriques-métriques. Ils fournissent des informations physiques sur la couronne, avec une sensibilité particulière aux électrons non thermiques, qui font de ces instruments un complément précieux des grandes missions spatiales de la discipline. Les trois instruments participent à la météorologie de l'espace par l'analyse post-événements et la fourniture de données de visualisation en temps réel au système expérimental de météorologie de l'espace FEDOME de l'armée de l'air. L'équipe en charge de ces instruments comprend trois scientifiques (LESIA) et plusieurs ingénieurs et techniciens de la station de radioastronomie de Nançay.

NRH, ORFEES

NRH (labellisé ANO6) : Il s'agit d'un instrument unique pour l'imagerie de la couronne en ondes métriques (150-450 MHz). Il est associé au radio-spectrographe ORFEES qui observe quotidiennement la couronne solaire entre 130 MHz et 1 GHz. Ces instruments observent les émissions du Soleil calme (NRH) et d'électrons non thermiques entre 0.1 et 0.5 rayon solaire au-dessus de la photosphère. C'est une région charnière pour l'accès des particules, structures magnétiques instables et ondes de choc au milieu interplanétaire. Les données sont mises à disposition sur le site web Radiio Monitoring (<http://secchirh.obspm.fr/>) de Meudon, qui offre aussi une visualisation combinée des observations solaires de plusieurs instruments nationaux et internationaux. Depuis 2016, une page contenant les spectres d'ORFEES en temps réel est également disponible pour le grand public sur le site web de la station. Depuis 2018 les données NRH-ORFEES sont distribuées par une base de données construite à Nançay (<https://rsdb.obs-nancay.fr/>).

Le NRH est à l'arrêt depuis 2015 pour une mise à jour majeure du système temps réel et le remplacement du corrélateur. L'objectif de ces travaux est d'améliorer la qualité des observations et

la détection des pannes récurrentes, d'incorporer des moyens d'analyse des dysfonctionnements dans le système, d'améliorer les communications RF et la sécurité électrique dans toutes les antennes. Le renouvellement des systèmes focaux des antennes est également en cours. La durée de l'arrêt avait été initialement sous-estimée. La reprise des observations solaires est prévue en 2019.

Nombre de publications sur la période 2015-2018 : 42 (revues de rang A)

Prospective

Le NRH et ORFEES auront un rôle important de soutien aux expériences spatiales *Solar Orbiter* et *Parker Solar Probe* pour l'étude de la couronne et de la propagation des perturbations (CMEs, ondes de choc, particules énergétiques) dans la couronne et vers l'héliosphère. Ils joueront également un rôle clé dans le développement de la météorologie de l'espace en lien avec FEDOME. La base de données sera développée pour être compatible avec les standards OV. Le système de visualisation Radio Monitoring visera une couverture accrue, idéalement 24 h/24 h, en intégrant des instruments supplémentaires.

Par ailleurs, des programmes d'observations coordonnées avec LOFAR, qui donne accès à des régions plus élevées de la couronne, pourront être réalisés. Une nouvelle voie sur LOFAR, *LOFAR for space weather*, est étudiée pour l'observation des CME, dans le cadre d'un projet H2020 en cours.

Réseau décamétrique, NDA

Le NDA est un radiospectrographe pour les émissions à basse fréquence du Soleil (5-80 MHz) et de Jupiter (10-40 MHz). Mis en service en 1977, il a subi des jouvences régulières. En 2016, l'installation de nouveaux récepteurs numériques (récepteur JunoN) a permis d'améliorer la résolution temporelle et spectrale. Ceci est essentiel pour, par exemple, l'étude de la micro-physique des émissions radio joviennes par instabilité résonante cyclotron électron-onde dans les zones aurorales. Comme cette haute résolution n'est pas accessible sur l'instrument Juno/Waves, le NDA joue un rôle important en support à cette mission vers Jupiter.

Sur le Soleil, les observations dans la bande de fréquence (5-80 MHz), complémentaire au NRH-ORFEES, permettent de tracer les processus éruptifs vers la plus haute couronne et le milieu interplanétaire. C'est un élément essentiel pour la compréhension des relations Soleil-Terre.

Nombre de publications sur la période 2013-2018 :

- 27 (revues de rang A) dans la thématique physique solaire,
- 8 dans la thématique magnétosphère Jovienne.

Prospective

Côté scientifique :

- Les observations de Jupiter en soutien à la sonde Juno seront poursuivies (fin de mission en 2021)
- Des observations de soutien sol seront mises en place en support à *Parker Solar Probe* et à *Solar Orbiter*, avec passage du soleil en cible prioritaire (8h / jour).
- A plus long terme, des activités de surveillance solaire au long cours et de soutien au NRH-ORFEES pour la météorologie de l'espace seront développées.

Côté données :

- la numérisation des archives 1970-1990 lancée en 2018 sera poursuivie
- la refonte de la base de données NDA (format OV standard etc.) sera finalisée.

Côté instrument : Il faudra élaborer un plan de renouvellement complet de l'électronique, aussi vieille que l'instrument lui-même et susceptible de tomber en panne à tout moment.

L'étude des magnétosphères planétaires et exoplanétaires passe aussi par l'avènement de la nouvelle génération de radio-télescopes comme NenuFAR (livret blanc : Zarka et al. 2014), en cours de construction à Nançay et précurseur officiel du *Square Kilometer Array* (SKA; livret blanc SKA-France : Ferrari et al. 2017), qui a été inscrit sur la feuille de route des TGIR de l'INSU en 2018.

Message

Le PNST soutient pleinement les trois instruments Solaire/magnétosphères de la station de Nançay dont la complémentarité est unique au niveau mondial pour l'étude des phénomènes éruptifs dans la couronne et les relations Soleil-Terre.

EISCAT

Le réseau de radars à diffusion incohérente de l'organisation européenne EISCAT est en fonction depuis les années 80 pour les radars continentaux et depuis la fin des années 90 pour les radars installés sur l'île du Spitzberg. EISCAT dispose donc à l'heure actuelle de 6 antennes :

- Une antenne émettrice/réceptrice VHF située à Tromsø en Norvège
- Une antenne émettrice/réceptrice UHF située à Tromsø complétée de deux antennes réceptrices en Suède et Finlande, le tout constituant un système tristatique permettant la mesure des 3 composantes du vecteur vitesse du plasma ionosphérique dans un volume donné. (Suite à l'interdiction d'utiliser la bande UHF en Finlande, les deux antennes réceptrices finlandaise et suédoise ont été converties en bande VHF et fonctionnent désormais avec l'émetteur VHF de Tromsø.)
- Deux antennes émettrices/réceptrices sur l'île du Spitzberg : les EISCAT Svalbard Radars (ESR).

Le système de radars a été constamment amélioré depuis, tant en amont, avec un système d'émission complètement revu et de puissance augmentée, qu'en aval avec des méthodes d'analyse de plus en plus performantes. L'organisation scientifique EISCAT s'est enrichie ces dernières années de nouveaux membres de taille avec le Japon et la Chine, mais a perdu la France, pourtant un des membres fondateurs.

Le temps d'observation des radars a toujours été partagé entre temps commun (common programme – CP) dont les données étaient accessibles par tous les associés et temps discrétionnaire (special programme - SP) propriété du pays responsable pendant 1 an (l'embargo est désormais porté à 3 ans pour toutes les données brutes ; seules des données de basse résolution sont disponibles rapidement pour les extérieurs au consortium). L'attribution de temps discrétionnaire se faisait au prorata de la contribution financière annuelle. Les pays non associés comme la France après son désistement en 2007 pouvaient acheter des heures d'observations à un taux horaire dépendant des radars. Depuis 2014, ce système a été entièrement revu et l'achat d'heures n'est plus possible. Pour avoir accès aux radars, un pays ou un institut doit maintenant être membre associé à part entière, ou membre affilié. La communauté française n'a pu acquérir que ce dernier statut, retrouver un statut d'associé ayant été rejeté par l'INSU.

Prospective

Les radars continentaux ont clairement vocation à être remplacés par EISCAT 3D (voir ci-après). Les radars du Svalbard en revanche sont les seuls au monde à pouvoir sonder l'ionosphère diurne en connexion directe avec le vent solaire via le cornet polaire et ce pendant la nuit polaire, condition indispensable à l'observations des aurores dites du côté jour. Ils resteront donc en fonction et continueront à assurer les indispensables observations à haute latitude ainsi que les conjonctions avec les missions satellites de tout type.

EISCAT 3D

En Norvège continentale, après 35 ans de bons et loyaux services, le système tristatique est en cours de remplacement par un nouveau réseau de radars. Pour avancer significativement dans les domaines de la microphysique ionosphérique par exemple, il est indispensable d'atteindre des résolutions temporelles et spatiales sensiblement plus élevées. Ceci ne peut se faire que par l'utilisation d'une autre technologie : les réseaux phasés. En lieu et place des grosses paraboles émettrices et/ou réceptrices actuelles, le futur système EISCAT 3D sera constitué de milliers de petites antennes émettrices et/ou réceptrices individuelles. (Le site émetteur sera installé à Skibotn en Norvège continentale et 4 sites récepteurs sont prévus en Finlande et Suède.) L'émission du signal (forme du lobe, direction) sera entièrement déterminée numériquement. Aussi, la modularité d'émission de faisceaux permettra d'effectuer plusieurs observations simultanément. Ajouté aux plus faibles coûts d'opération, cela permettra de faire des opérations 24h/24 (en ne sollicitant qu'une partie du réseau) et contribuer ainsi à la surveillance de l'environnement ionisé terrestre et de participer aux efforts de météorologie de l'espace.

Les études préliminaires à EISCAT 3D se sont faites en 3 phases. Une étude de faisabilité (FP6) s'est terminée au printemps 2009. Une phase préparatoire, financée dans le cadre de FP7 a débuté en octobre 2010 et se terminait en 2014. La communauté française a participé à cette phase préparatoire, en tant que partenaire associé au *work package 3 « science planning and user engagement »* et à la rédaction du principal livrable : le *science case*¹ (McCrea et al. 2015). Dans le cadre d'un financement européen « *EISCAT 3D : Preparation for Production* », un premier module émetteur-récepteur test a été construit et est opérationnel ; les premiers essais ont été menés avec succès. La construction d'EISCAT 3D débutera en 2019, la construction du cœur (émetteur/récepteur principal) pendant l'été 2020 et les stations latérales l'été suivant. Nous aurons donc un système pleinement opérationnel à l'horizon 2021/2022. Rappelons enfin que EISCAT 3D a été inscrit dans la liste des ESFRI *Projects* et maintenant qu'il est en phase de construction, il devrait figurer dans les ESFRI *Landmarks*, c.-à-d. la liste des projets ESFRI réalisés.

Prospective : les enjeux scientifiques, comme décrits dans le *science case*, couvrent un domaine vaste de la mésosphère (atmosphère neutre) jusqu'aux plus hautes couches de l'ionosphère. Ils interresseront une communauté plus large que celle du PNST. Le groupe de définition des objectifs scientifiques (McCrea et al. 2015) a identifié cinq grands domaines pour lesquels EISCAT 3D offrira des possibilités inédites pour un même instrument :

- La physique de l'atmosphère et le changement climatique avec des contributions aux couplages ionosphère-thermosphère ; les effets des relations Soleil-Terre sur la moyenne atmosphère ; le couplage dynamique et chimique avec la mésosphère ; la turbulence atmosphérique dans la stratosphère et la mésosphère ; les évolutions sur des échelles de temps courtes et longues de la haute atmosphère

¹ https://www.eiscat3d.se/sites/default/files/EISCAT3D_ScienceCase_final.pdf

- La physique des plasmas spatiaux avec les couplages magnétosphère – ionosphère ; la dynamique aurorale, les structures de petites échelles dans l'ionosphère ; les courants et l'apport d'énergie dans l'ionosphère ; l'échappement d'ions ; etc.
- L'exploration du système solaire avec le sondage planétaire ; la surveillance des astéroïdes ; le vent solaire par scintillation interplanétaire.
- Les services à la météorologie de l'espace : observations continues, mesure de TEC et scintillation, modélisation.
- Méthodes et techniques radar : techniques d'observations, codage du signal, acquisition, etc.

Les attentes concernant EISCAT 3D sont immenses tout comme les possibilités offertes. Avec des résolutions spatiales et temporelles améliorées d'un facteur 10 au moins, la microphysique ionosphérique sera enfin accessible. De plus, un mode de fonctionnement « survey » avec l'émission 24h/24 sera très utile pour la surveillance de l'environnement spatial aux latitudes aurorales. Il sera légitime d'envisager une réintégration de la France dans le consortium EISCAT ainsi qu'une relabellisation comme SNO.

SuperDARN

Le programme international SuperDARN (Super Dual Auroral Network) est constitué d'un ensemble de radars hautes fréquences (HF). Ces radars sont groupés par paires partageant un champ de vue commun, donnant ainsi accès à la cartographie vectorielle du champ de vitesse du plasma ionosphérique dans les régions aurorales et polaires des hémisphères Nord et Sud. La couverture planétaire du réseau et le fonctionnement continu des radars font de SuperDARN un outil de choix pour étudier les différences de comportement dynamique entre les deux hémisphères, pour étudier l'efficacité du couplage local entre l'ionosphère et la magnétosphère, lors par exemple d'événements de reconnexion transitoire côté jour ou côté nuit, pour étudier les asymétries interhémisphériques ou pour reconstruire la densité électronique de l'ionosphère à travers la caractérisation de la propagation des ondes HF dans le milieu. Enfin, la convection représente un bon indicateur de l'état global de la magnétosphère et offre la possibilité de mettre en contexte les données d'autres instruments, en particulier les données satellitaires. Le réseau SuperDARN se développe actuellement dans l'hémisphère Sud, la calotte polaire Nord et à moyennes latitudes.

Depuis l'origine du projet en 1995, la France a été impliquée jusque dans trois radars du réseau SuperDARN. Il a été décidé de réduire cette participation en 2008 et elle ne comprend plus depuis 2013 que le radar de Kerguelen géré conjointement par l'INSU (d'abord au LPC2E jusqu'en 2012 puis à l'IRAP) et l'IPEV (Institut Paul Emile Victor). Les radars de Stokkseyri et du Dôme C ont été cédés à d'autres équipes du consortium. SuperDARN est un service national d'observation (SNO) labellisé de l'INSU (AA-ANO6), rattaché au groupe « ionosphère » de l'IRAP. Ce radar, de part sa localisation dans l'hémisphère sud où les sites possibles sont rares, joue un rôle important dans le réseau SuperDARN.

Après presque 20 ans et malgré des maintenances régulières (dernière en date été austral 2013-2014), une rénovation complète est nécessaire car le radar subit de fortes dégradations liées en particulier aux conditions météorologiques (vent, pluie). La mission aura lieu durant la campagne d'été austral 2019-2020.

Prospective : La propagation des ondes HF est un sujet d'actualité du point de vue opérationnel, les sources de perturbations des signaux liées à la dynamique ionosphérique étant mal appréhendées par les modèles simplistes dont ceux qui sont le plus souvent utilisés sont statistiques ou empiriques (modèles NeQuick, IRI, couche de Chapman). D'un point de vue théorique, les modèles TRANSCAR et IPIM développés dans le groupe « ionosphère » de l'IRAP (Blélly et al. 2005 ; Marchaudon et Blélly,

2015) peuvent décrire cette dynamique sur une gamme d'échelles spatiales et temporelles pertinentes pour étudier l'effet sur la propagation des ondes.

Message : La France assure, avec le radar de Kerguelen, un rôle important dans le réseau SuperDARN. Le programme scientifique et l'imbrication étroite entre observations et modèles justifient pleinement une poursuite de l'opération et donc une jouvence de l'instrument. La physique ionosphérique joue de plus un rôle important dans le cadre de la météorologie de l'espace, mais la communauté française est réduite. Il faut être vigilant pour éviter que cette communauté ne devienne sous-critique.

Observations synoptiques et Météorologie de l'espace

La communauté scientifique française soutient les observations synoptiques du Soleil et la météorologie de l'espace par un ensemble de petits instruments au sol qui sont ou non labellisés en tant que ANO6.

Un atelier, soutenu par le PNST, a été organisé à Nice en octobre 2016, sur le thème *Synoptic ground-based solar observations for space weather*. (<https://meteospace.sciencesconf.org/>).

Spectrohéliographe de Meudon (labellisé ANO6)

Les spectrohéliogrammes de Meudon sont des images de la photosphère et de la chromosphère solaires dans certaines longueurs d'ondes. Leur observation a pour objectif de donner une vue d'ensemble de l'état de la basse atmosphère solaire, un jour donné, et de surveiller l'évolution de l'activité solaire à long terme (échelle du cycle solaire de 11 ans et au-delà - les observations existent depuis 110 ans). Les cubes de données (x, y, lambda) contenant en tout point du Soleil les profils complets des raies H α , CaII H et K constituent un dispositif unique au monde.

Ces données sont un soutien à la préparation de campagnes spécifiques d'observations et à l'étude de la variabilité des cycles dans la photosphère et la chromosphère, à la source de l'activité solaire. Les données sont distribuées par BASS2000 (voir ci-dessous).

Prospective:

L'extension des observations aux raies infra rouges de CaII 8498/8542 et de H beta est prévue en 2019, de manière à compléter le dispositif axé sur les raies de l'hydrogène et du calcium D. Il est d'autre part prévu d'améliorer le logiciel de correction des données (via un Flat Field qui demande des développements instrumentaux opto-mécaniques non encore disponibles), d'intégrer au service un outil automatisé de calibration des raies en longueur d'onde et de développer des logiciels à valeur ajoutée pour le repérage automatisé des structures solaires et la génération de cartes synoptiques de la chromosphère.

En 2019, les services labellisés ANO6 spectrohéliogrammes, NRH et CERCLE, ainsi que BASS2000 (ANO 5) ont demandé une labellisation conjointe sous forme d'un seul service, appelé 3Soleil, avec l'objectif d'améliorer l'utilisation des ressources par un fonctionnement coordonné et d'accroître la visibilité en tant que service de surveillance solaire.

CLIMSO (labellisé ANO6) Surveillance de la couronne solaire

Il s'agit d'un ensemble de petits instruments installés depuis 2006 au Pic-du-Midi : deux coronographes et deux lunettes de 20 cm de diamètre pour les observations sur le disque en H α , CaII, HeI et FeXIII à 1.047 μ m. Ces instruments ont deux objectifs : le suivi à long terme du Soleil (sur plusieurs cycles de 11 ans) sur le disque et la couronne à raison de une image par minute (une toutes les 30 mn pour la couronne en FeXIII), et également la surveillance en temps réel de l'activité solaire (pour la météorologie de l'espace).

Ces instruments sont gérés par deux chercheurs, en collaboration avec deux ITA (0,6 ETP) pour l'informatique et la gestion des données. Les observations quotidiennes sont assurées par une association d'observateurs amateurs bénévoles (les Observateurs Associés) qui se succèdent par équipe de deux personnes sur des périodes d'une semaine.

Les données sont archivées sur Bass2000 et prochainement sur une nouvelle base aux standards OV développée à l'OMP.

Depuis 2014 ce service est l'un des deux seuls observatoires au sol à donner régulièrement des images de la couronne en FeXIII. L'autre observatoire, sur l'île de Maui (Hawaï) est à douze heures de décalage.

Prospective :

L'équipe propose le développement d'un nouveau coronographe (C3) pour la mesure de la polarisation de la raie verte du Fe XIV en vue d'obtenir des contraintes directes sur les structures magnétiques coronales qui jouent un rôle clé dans le déclenchement des éjections de masse et l'accélération du vent solaire.

Le PNST considère que ce service constitue un exemple remarquable de science participative qui fonctionne depuis 2006. Les développements instrumentaux récents visant à la mesure de la polarisation de raies d'émission coronales pour obtenir des contraintes directes sur le champ magnétique coronal sont à soutenir. Cette mesure n'est réalisée actuellement que par un seul instrument au monde (COMP) installé à Maui (Hawaï), à 12 heures de décalage du Pic du Midi.

PICARD-sol

C'est un ensemble d'instruments destinés au suivi à long terme du rayon solaire depuis le sol (<https://solar-physics.oca.eu/spip.php?rubrique58>). Il est implanté au plateau de Calern sous la responsabilité de l'Observatoire de la Côte d'Azur (OCA). Il comprend un système développé à l'OCA permettant la mesure des paramètres de la turbulence atmosphérique (MISOLFA) ainsi qu'un télescope de 11 cm de diamètre formant des images du disque solaire dans quatre bandes spectrales, l'instrument SODISM2. Ces deux instruments sont opérationnels sur le site de Calern depuis mars 2011. Ils ont été complétés par un photomètre multi longueurs d'onde (prêt de l'université de Lille) et intégré au réseau AERONET (*AEROSOL Robotic NETwork*) de la NASA), un pyranomètre et une caméra grand champ permettant de qualifier à chaque instant la qualité des images acquises. SODISM-2 est placé dans une cuve permettant la régulation en température et pression de l'ensemble du télescope et de sa structure. Il fournit des images 2048x2048 avec 1 arc-seconde de résolution dans 4 longueurs d'onde du continuum à 535 nm, 607 nm, 782 nm et 1025 nm ainsi que dans la raie K d'absorption du Calcium à 393.37 nm (Ca II). La cadence maximale d'acquisition est de une image par minute. Un premier niveau de calibration radiométrique permet la production de données qui peuvent être diffusées en quasi temps réel (3 à 8 minutes après acquisition) et ouvre la porte à d'éventuelles autres applications (suivi de l'irradiance spectrale, météorologie de l'espace). Les données sont archivées au CNES pour la période 2011-2014, et à l'OCA jusqu'à la période présente: <https://lagrange.oca.eu/fr/lag-physol-data/lag-physol-picardsol>.

Cet ensemble a fonctionné en parallèle avec la mission PICARD du CNES pendant deux ans (2011 à 2013). A la suite de l'arrêt de la mission PICARD, le service PICARD-sol a été dé-labellisé par l'INSU, mais il continue à fonctionner. L'analyse des données du moniteur de turbulence et leur application aux mesures du rayon ont fait l'objet d'une thèse (Rabah Ikhlef) soutenue fin 2016. Ce travail a montré que la précision des mesures permet d'assurer que toute variation du rayon solaire supérieure à 50 mas au cours du cycle pourrait être détectée.

L'équipe vise à obtenir un cycle solaire entier de mesures. La dé-labellisation est un problème pour assurer la continuité des observations, qui continuent néanmoins.

Publications : 7 publications dans des revues de rang A entre 2014 et 2019, avec un communiqué de presse de l'INSU en juin 2018.

Bien que la synergie avec la mission PICARD n'a plus lieu, le travail engagé couvre une partie du cycle 24 d'activité solaire. Le PNST est d'avis que l'objectif de poursuivre les observations pendant un cycle solaire est tout à fait justifié au vu de la qualité des données obtenues après correction des effets de la turbulence atmosphérique qui permettent d'assurer que toutes variations d'origine solaire supérieures à 50 mas sont détectables. Etant donné le soutien de l'OCA au projet, il serait contreproductif de l'arrêter trop tôt.

METEOSPACE : <https://solar-physics.oca.eu/spip.php?article507>

Ce projet, qui sera implanté sur le plateau de Calern, est actuellement développé en collaboration entre l'Observatoire de Paris, l'Observatoire de la Côte d'Azur, l'armée de l'air (via FEDOME) et une société privée : LUNA technologie.

Il s'agit d'un ensemble de petits télescopes en H α , CaII H et K, et en bande G pour la surveillance de l'activité solaire, avec des objectifs scientifiques et de météorologie de l'espace par la détection des phénomènes solaires rapides et transitoires. La résolution spatiale des images sera de une seconde d'arc avec une résolution temporelle de 10 secondes pour la raie H α et de 60 secondes pour les autres longueurs d'onde. Les instruments fonctionneront en mode automatique. L'objectif scientifique sont les instabilités et phénomènes transitoires dans la chromosphère solaire: destabilisation de filaments, éruptions, ondes de Moreton, etc ... Grâce à sa haute résolution temporelle, l'instrument sera un soutien important aux expériences spatiales. L'automatisation fait que les données pourront aussi être disponibles en temps réel pour un service opérationnel en météorologie de l'espace.

Les télescopes et le bâtiment sont financés par la Direction Générale de l'Armement, la région Ile de France (via le DIM ACAV) et l'Observatoire de Paris. L'automatisation sera réalisée avec le soutien financier de l>IDEX Jedi de l'Université Côte d'Azur (UCA). La livraison de l'instrument et la première lumière sont prévues à l'automne-hiver 2019.

L'intégralité des données (images et séquences H α) et des codes sera ouverte à la communauté via BASS200 et un serveur à l'OCA. La société LUNA fournira les données opérationnelles à l'armée de l'air.

Le PNST considère que ce projet est complémentaire aux services de radio-astronomie (NRH et ORFEES) de la station de Nançay et de coronographie (CLIMSO) au Pic du Midi. Il produira des images du disque en lumière visible avec une meilleure résolution temporelle. Il constitue un soutien important aux missions spatiales comme *Parker Solar Probe* et *Solar Orbiter*. Son objectif est de participer aux grands réseaux internationaux qui sont mis en place pour distribuer à la communauté des données sol pour la recherche fondamentale sur l'activité solaire et pour le suivi et la prévision de la météorologie de l'espace.

CERCLe (labellisé ANO 6)

CERCLe est dédié à la surveillance du rayonnement cosmique dans l'environnement spatial de la Terre. Le spectre de basse énergie du rayonnement cosmique, de l'ordre de 1-10 GeV, comprend des nucléons d'origine galactique, qui constituent un flux permanent modulé par le champ magnétique de l'Héliosphère, et une contribution sporadique liée à certaines éruptions solaires. La technique traditionnelle de mesurer ces particules repose sur les moniteurs à neutrons au sol, détecteurs de particules qui mesurent des neutrons issus des cascades qu'engendrent des protons et ions primaires.

Les deux moniteurs à neutrons français des Iles Kerguelen (Océan Indien) et de Terre Adélie (Antarctique) sont sous la responsabilité technique de l'Institut Polaire Paul-Emile Victor (IPEV). Le service ANO 6 CERCLe est en charge de l'exploitation. Il valide les données et les fournit à la base de données NMDB (www.nmdb.eu) – base de données financée en tant que projet FP7 de l'Union Européenne en 2008-09 et qui s'est développée depuis en englobant la quasi-totalité du réseau mondial des moniteurs à neutrons (une cinquantaine). La base de données est hébergée à l'Université de Kiel (Allemagne). Le CERCLe participe activement au développement des outils. Il a notamment développé et maintient l'interface graphique de représentation des observations et de l'accès aux données.

CERCLe a un rôle actif en météorologie de l'espace: dans le cadre de la surveillance des doses de radiation du personnel navigant, qui est en France une obligation légale, CERCLe fournit à l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) des données d'entrée. Il évalue les doses supplémentaires de radiation reçues lors d'un événement solaire à particules. Dans le cadre d'un service opérationnel de météorologie de l'espace pour l'aviation civile mondiale, qui entre en opération en 2019, CERCLe fournit à la société toulousaine CLS les outils pour la surveillance en temps réel des doses de radiation, en collaboration avec l'IRSN. C'est CLS qui est en charge, pour le consortium français SPECTRA qu'elle forme avec Météo France et la société ESSP, de l'activité opérationnelle "radiations" au sein d'un consortium réunissant l'Australie, le Canada, la France et le Japon.

L'équipe impliquée dans CERCLe comprend deux chercheurs et un ingénieur à l'Observatoire de Paris, ainsi qu'un soutien technique et l'hébergement des moniteurs à neutrons dans les stations Kerguelen et Terre Adélie de l'IPEV.

Prospective:

CERCLe continuera à soutenir la recherche et ses applications en météorologie de l'espace. Les moniteurs à neutrons restent des outils de base pour mesurer le spectre d'énergie des nucléons solaires au-delà de 500 MeV, ce qui fait de ces instruments le complément haute énergie nécessaire des mesures spatiales des particules avec Parker Solar Probe et Solar Orbiter. CERCLe garde par ailleurs une position clef dans le domaine de la météorologie de l'espace et compte soutenir l'activité opérationnelle du consortium français SPECTRA pour l'aviation civile mondiale.

CERCLe fait partie, avec les services spectrohéliogrammes, NRH et BASS2000, de la demande de labellisation conjointe "3Soleil", soumise à l'INSU en 2019.

Magnétomètres au sol BCMT (SNO labellisé par l'INSU)

Ce réseau de magnétomètres est traité dans la section Bases et services de données.

Polarimètres sol pour l'observation des aurores (IPAG)

L'IPAG Grenoble développe une instrumentation sol pour l'observation des aurores. Il s'agit de faire de la polarimétrie à des altitudes de 80 à 300 km. La polarimétrie devra fournir des indications sur la direction des courants électriques, tandis que le taux de polarisation renseigne sur l'énergie des

électrons excitateurs. Le PNST a accompagné des projets de développement de cette instrumentation, qui fournit un des rares moyens observationnels dans une région accessible ni aux ballons, ni aux satellites. La réalisation d'un instrument léger, autonome en énergie, et d'un démonstrateur d'instrument capable de mesurer la polarisation dans quatre raies spectrales, est en cours.

Instrumentation spatiale

Contexte

La communauté PNST possède une expertise riche et active dans l'instrumentation spatiale pour l'observation du Soleil, du vent solaire, des magnétosphères et de l'ionosphère. La présence française importante sur la mission SoHO perdure du fait de l'extension de la mission jusqu'en 2020 au moins. La communauté française a exercé une activité de premier plan dans la mission STEREO, avec la seule expérience PI non-US (le radio spectrographe WAVES), et la fourniture d'optiques EUV. La France fournit la seule contribution hardware en dehors des USA à la mission *Parker Solar Probe*, contribuant aux instruments de mesure du champ magnétique et du spectre d'électrons. Sur la mission *Solar Orbiter* de l'ESA, elle est PI de l'instrument RPW (ondes radio et plasma), PI des opérations de SPICE (spectrographe imageur coronal), co-PI de EUI et SWA, et co-I avec une contribution hardware sur PHI et STIX. En physique de la magnétosphère, la France a fourni des contributions hardware à la mission NASA MMS qui est, comme nous l'avons vu aux chapitres précédents, en train de produire des résultats spectaculaires sur la reconnexion magnétique. L'expérience historique sur l'exploration spatiale de l'ionosphère terrestre avec DEMETER se poursuit avec le satellite TARANIS, qui ouvrira de nouveaux domaines de recherche avec le couplage magnétosphère-ionosphère-atmosphère neutre dans la thématique électricité atmosphérique. La France a d'autre part des participations hard importantes dans plusieurs sondes explorant les magnétosphères planétaires, notamment *BepiColombo*.

Tandis que l'expertise des laboratoires spatiaux français est évidente, les choix programmatiques de l'ESA nous mettent devant un problème stratégique. La participation très active aux phases A des projets THOR et ALFVEN n'a pas été couronnée de succès, alors que ces missions auraient ouvert de nouvelles voies dans les domaines d'excellence de la communauté PNST. Ceci pose un problème sérieux pour les équipes techniques dans les années à venir. Il sera de plus important de veiller à des contributions en instrumentation sur des missions d'opportunité et sur d'éventuels projets en météorologie de l'espace, comme par exemple une mission au point de Lagrange L4 ou L5.

Instrumentation en opération ou livrée

Une des priorités du PNST est le programme obligatoire de l'ESA qui, en retour, contribue à structurer l'activité de la communauté. Ceci impose notamment la réalisation de la dernière mission "Pierre Angulaire" du programme "Horizon 2000" et celle de la mission du programme "Cosmic Vision", à savoir : les missions *BepiColombo* et *Solar Orbiter*.

Solar Orbiter et Parker Solar Probe

Sur le plan programmatique, la dernière période d'activité a vu la réalisation des sondes *Solar Orbiter* et *Parker Solar Probe* (PSP) et de l'instrumentation associée. *Solar Orbiter*, dont le lancement est programmé pour le 6 février 2020, est dédiée à des observations d'imagerie à haute résolution spatiale combinées à des mesures in-situ très près du Soleil (périhélie 0,29 UA) et à des observations hors écliptique (dans la phase étendue de la mission). Les instruments ont été livrés par les laboratoires courant 2017 et le satellite est en cours d'intégration chez Airbus Defense Space. Après les missions SOHO et *Ulysses*, cette mission fédère l'ensemble des laboratoires de physique solaire et héliosphérique en France et en Europe. La communauté scientifique française et le Centre National d'Etudes Spatiales sont très impliqués dans le développement de la charge utile (voir Tableau 1).

Notre compréhension actuelle du système Soleil/héliosphère a été largement alimentée par les résultats obtenus par une série quasi ininterrompue de missions spatiales lancées à partir des années 1960. Cependant, aucune de ces sondes n'était conçue pour explorer de façon unifiée les relations

qui existent entre notre étoile et son environnement. Pour ce faire, trois conditions doivent être remplies. Il faut aller proche du Soleil pour analyser le vent solaire avant que ses propriétés ne soient modifiées par sa propagation dans l'héliosphère. Il faut sortir du plan de l'écliptique pour pouvoir observer les pôles d'où s'échappe le vent solaire rapide. Enfin, il faut une combinaison de mesures in situ et d'observations télescopiques de manière à pouvoir établir la connexion entre les structures de l'atmosphère solaire et les propriétés locales du vent. Si les sondes *Helios* se sont approchées jusqu'à 0.3 U.A. du Soleil, c'était sans l'instrumentation à bord et sans le soutien sol nécessaires pour pouvoir faire le lien entre les perturbations détectées in situ dans le vent solaire et leurs régions sources. *Ulysses* a pour la première fois survolé les pôles du Soleil, mais à très grande distance et là encore sans télédétection.

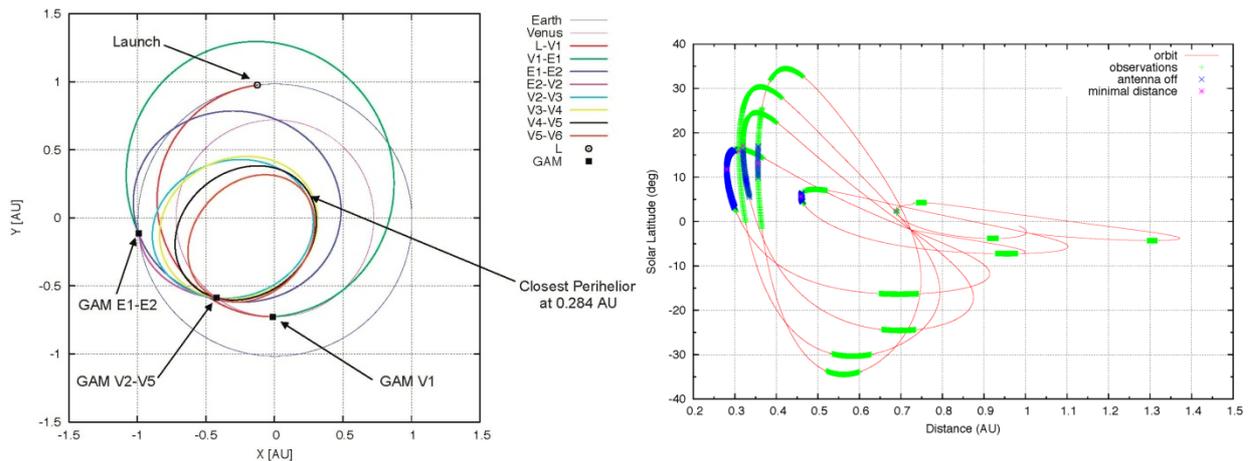


Figure 24. L'orbite de Solar Orbiter. A gauche, vue depuis le nord de l'écliptique montrant les manœuvres d'assistance gravitationnelle (GAM) avec la Terre et Venus. A droite, la latitude héliographique de la sonde en fonction de sa distance au Soleil au cours de la mission. Les périodes d'observations sont notées en vert.

L'orbite de *Solar Orbiter* (illustration non actualisée Figure 24) a été spécialement conçue pour permettre pour la première fois d'amener une batterie complète d'instruments in situ et de télédétection proche du Soleil et hors du plan de l'écliptique. En plus de vues à haute résolution (environ 100 km sur le Soleil) et la possibilité d'observer les pôles, cette orbite réduit la rotation apparente du Soleil durant les passages au périhélie, permettant ainsi des observations prolongées des régions sources qui produisent les perturbations mesurées in situ. Le lancement est prévu depuis Cape Canaveral par un lanceur américain. Plusieurs manœuvres d'assistance gravitationnelle seront utilisées pour finalement placer la sonde sur une orbite elliptique autour du Soleil d'environ 6 mois jours de période avec un périhélie à 0.29 U.A., soit légèrement plus proche que Mercure. La sonde approchera le Soleil au plus près environ deux ans et demi après le lancement. Ensuite, toutes les trois ou quatre orbites, la gravité de Venus sera utilisée pour augmenter progressivement l'inclinaison. La mission nominale s'achèvera sept ans après le lancement alors que la sonde aura atteint 25° d'inclinaison par rapport à l'équateur solaire. Une extension de la mission devrait permettre d'atteindre plus de 35 degrés d'inclinaison.

Du fait de cette orbite très particulière, *Solar Orbiter* est une mission très ambitieuse non seulement scientifiquement, mais aussi techniquement. La sonde et son instrumentation seront soumises à un environnement très rude nécessitant des solutions spécifiques. La densité de rayonnement solaire atteinte à 0.29 U.A. (environ 13 fois celle au niveau de la Terre) impose l'utilisation d'un bouclier thermique. Les panneaux solaires doivent être orientables pour pouvoir fonctionner dans les conditions de température et d'illumination très variables entre le périhélie et l'aphélie. Le flux de particules est aussi très contraignant pour certains composants optiques ou électroniques qui doivent être spécialement qualifiés. Les caractéristiques principales de la charge utile sont résumées dans le tableau suivant.

Tableau 1 : Les instruments de la mission Solar Orbiter

Instrument	Mesures
SWA	Propriétés des constituants du vent solaire: électrons, protons, alphas, ions lourds
EPD	Composition et fonctions de distribution des particules suprathermiques et énergétiques
MAG	Champ magnétique
RPW	Ondes électromagnétiques et électrostatiques dans le vent solaire
PHI	Champ magnétique vectoriel et vitesse Doppler dans la photosphère
EUI	Images du disque et de la couronne dans l'UV/EUV à haute résolution et à grand champ
SPICE	Spectroscopie EUV à haute résolution du disque et de la couronne solaires
STIX	Images et spectres des émissions X
METIS	Images et spectres de la couronne visible, UV et EUV
SoloHI	Images en lumière blanche de la couronne étendue

On notera 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 communauté participe également à la mission *Parker Solar Probe* de la NASA, après réponse à l'appel d'offre émis en 2009 concernant l'instrumentation. Cette mission, lancée en août 2018, est complémentaire de *Solar Orbiter*. Elle 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 PSP et à distance par *Solar Orbiter* (avec PSP 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 PSP permettra une avancée historique en pénétrant pour la première fois dans l'atmosphère de notre étoile (jusqu'à 10 rayons solaires) afin d'élucider les processus à l'origine du chauffage de la couronne et de l'accélération du vent solaire.

Solar C

La mission Solar C est la prochaine grande mission de physique solaire de l'agence spatiale japonaise. Afin de comprendre les mécanismes de transfert d'énergie entre la photosphère et la couronne, et ses conséquences pour la structure et la dynamique de l'atmosphère solaire, il est nécessaire de sonder les structures solaires à toutes les échelles spatiales et temporelles pertinentes, mais particulièrement aux petites échelles. Dans chaque domaine de température, des structures élémentaires sont créées et évoluent selon des processus physiques différents. Les processus en jeu incluent des flux de masse, des mouvements turbulents, et des ondes créées par la libération d'énergie magnétique. Toutes les analyses indiquent que la compréhension de ces phénomènes nécessite un spectrographe imageur FUV/EUV ayant une résolution et une surface collectrice d'un ordre de grandeur plus importantes que les instruments disponibles actuellement. Solar C a été

sélectionnée pour une phase A compétitive par la JAXA en juillet 2018. La sélection finale aura lieu fin 2019 pour un vol en 2025. La participation française au spectrographe EUVST de Solar C comprendra la fourniture du réseau de diffraction et de sa monture, ainsi que du mécanisme de focalisation. Cette fourniture se fait dans la continuité de l'expérience acquise sur les projets CLASP et SPICE.

BepiColombo

La communauté est fortement impliquée dans la mission *BepiColombo* 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 *BepiColombo* 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. Elles ont été lancées en Octobre 2018, pour une arrivée à Mercure en 2024. La mission *BepiColombo* contribuera en outre aux aspects de surveillance solaire décrits ci-dessus.

Taranis

Dans le cadre du programme multi-latéral, la mission *Taranis* est pour sa part la priorité de la discipline en France 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 (*Terrestrial 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 maintenant un lancement en 2020 en passager sur la fusée Vega. 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.

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 fournit également à la communauté un autre point de mesure dans l'héliosphère, propice par exemple à l'étude de la propagation des CMEs.

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 de l'instrumentation adaptée d'une part à ces mesures mais aussi à la mesure des effets externes qui « parasitent » la mesure du champ interne. Ces effets parasites sont précisément ceux auxquels nous nous intéressons, et cette instrumentation est une aubaine pour les plasmiciens de la communauté PNST, car elle permet de faire des mesures précises de différents paramètres ionosphériques et thermosphériques. Un des objectifs auquel se prête particulièrement 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 la magnétosphère et l'ionosphère. Une partie non négligeable de l'énergie qui est transférée du vent solaire à la magnétosphère est en effet dissipée dans l'ionosphère polaire via ces courants alignés. Les mesures de SWARM couplées aux simulations numériques permettent 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 sont précieux pour obtenir une description spatio-temporelle des courants alignés à grande échelle.

Missions multi-satellites : *Cluster*, THEMIS, MMS

Concernant la magnétosphère terrestre, la communauté reste fortement engagée dans les missions *Cluster* (ESA, lancée en 2000), THEMIS (NASA, lancée en 2007) et MMS (NASA, lancée en 2015)

Pierre Angulaire du programme "Horizon 2000" de l'ESA, la mission *Cluster*, à laquelle la communauté PNST est largement associée, continue d'être un outil très performant d'étude des régions d'interactions vent solaire-magnétosphère et des mécanismes fondamentaux des plasmas astrophysiques qui les gouvernent. Les évolutions de son orbite, au cours des extensions de mission successives, ont permis d'aborder de nouveaux thèmes de recherche, invisibles lors de la phase initiale de la mission. Devenue multi-échelles – 2 satellites séparés de plusieurs rayons terrestres (R_t), les deux autres ayant des séparations modulables –, la constellation a pu ainsi étudier en détail la région de freinage (jet braking) dans la queue magnétosphérique (7-9 R_t), ou l'asymétrie aube-crépuscule du cornet polaire. Des données ont été recueillies pendant plusieurs semaines lors des traversées de région frontalières, choc, magnétopause, avec deux satellites distants de 3.5 km seulement, une séparation inimaginable par les concepteurs de la mission. Cette faible séparation devrait être de nouveau obtenue pour mieux comprendre les origines des émissions Souffle (hiss) Plasmasphérique, un des objectifs scientifiques de la nouvelle extension dont l'approbation est attendue de l'ESA. Au-delà des nouvelles configurations de l'orbite des quatre satellites planifiée pour l'étude de la physique choc-magnétogaine-magnétopause et du développement des ondes de Kelvin-Helmholtz le long de cette frontière, ce sont les études combinées avec les missions THEMIS et MMS qui sont attendues, avec en particulier des conjonctions rapprochées à la magnétopause en

2019-2022 qui devraient fournir des données uniques aux échelles électroniques, ioniques et globales.

La mission *Magnetospheric Multi-Scale* (MMS) de la NASA, pour sa part, est dédiée aux petites échelles. La communauté française participe aussi à cette mission qui fournit des données à une cadence 100 fois plus élevée que celle de *Cluster* et qui sonde le milieu jusqu'à l'échelle électronique (~10-100 km). Ces mesures permettent 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 CROSS SCALE, l'absence de mission dédiée à l'étude combinée des processus plasmas aux trois échelles fondamentales (fluides, ioniques, électroniques).

Bases et services de données

Contexte

La France offre à la communauté scientifique deux grandes bases de données spatiales dans le domaine des plasmas héliosphériques: le CDPP pour le vent solaire, les magnétosphères et ionosphères et MEDOC pour les observations du Soleil. Ces bases, construites en soutien des missions *Cluster* et *SoHO* et qui ont considérablement enrichi leur offre depuis, sont uniques en Europe. En dehors de la diffusion et de l'archivage des données, elles offrent des services à valeur ajoutée, par exemple des outils d'interconnexion entre des observations depuis plusieurs points de vue dans l'Héliosphère. Mentionnons d'autre part les indices géomagnétiques, calculés et diffusés par l'Université de Strasbourg et d'autres bases de données thématiques, pour les observations sol du Soleil, les mesures in situ de ceintures de radiation et les observations en spectro-imagerie de magnétosphères planétaires. L'évolution de BASS2000, avec un arrêt d'une grande partie des activités en physique solaire à Toulouse, a conduit à une réorientation vers Meudon, qui archive maintenant les données historiques du télescope THEMIS et développe des capacités d'accueil pour de nouvelles données haute cadence.

Les bases de données sont aussi le lieu des développements d'outils pour la météorologie de l'espace. L'absence de facto de la France du programme *Space Situational Awareness* de l'ESA jusqu'en 2016 a empêché la communauté française de jouer un rôle moteur au plan européen. La contribution de la France à ce programme porte maintenant entre autres sur CDPP et MEDOC. Il faut veiller à ce que l'ensemble des observations françaises soutenant la météorologie de l'espace puisse devenir disponible pour une communauté croissante d'utilisateurs, y compris en dehors de la recherche scientifique.

Les services

STORMS

Le *Solar-Terrestrial Observation and Modeling Services* (STORMS, <https://stormsweb.irap.omp.eu/>) labellisé par l'INSU ANO5 et ANO6 est une infrastructure destinée à fournir un ensemble de services aidant ou rendant possible certaines études des relations Soleil-Terre. STORMS a conçu et suivi le développement du *Propagation Tool* (<http://propagationtool.cdpp.eu/>, Rouillard et al. 2017) qui permet de relier les données de télédétection stockées à MEDOC (et à terme BASS2000) aux mesures in situ stockées au CDPP ainsi qu'aux images/spectres d'aurores planétaires stockées à APIS. Cet outil est déjà utilisé dans de nombreuses publications (Plotnikov et al. 2016, 2017, Rouillard et al. 2016, Sanchez-Diaz et al. 2017ab, André et al. 2017, Witasse et al. 2017). STORMS crée et met à disposition des catalogues issus de l'analyse des données comme par exemple le catalogue de régions d'interaction en corotation (CIRs) produit à partir de l'analyse des images héliosphériques (Plotnikov et al. 2016). Ce catalogue est visualisable par le *Propagation Tool*. Le service adapte aussi les modèles numériques issus de la recherche fondamentale (p. ex. Pinto & Rouillard 2017) afin de les rendre utiles à la météorologie de l'espace (ANO6). La chaîne de modélisation SWiFT fournit des prévisions de l'état du vent solaire à 1 UA (<https://stormsweb.irap.omp.eu/doku.php?id=swift>), STORMS mène aussi la création d'outils qui seront exploités par l'ESA pour la mission *Solar Orbiter*. Le *Connectivity Tool* (<http://storms-connectsolo.irap.omp.eu/>) permet d'estimer le point de connectivité magnétique des sondes héliosphériques à la surface solaire, cette information sera importante pour les opérations de *Solar Orbiter* par exemple le pointage des caméras) car plusieurs questions scientifiques nécessitent des études combinées des données de télé-détection de la source du plasma qui est ensuite mesuré in situ.

MEDOC

Le *Multi Experiment Data and Operation Center* (MEDOC, <http://medoc.ias.u-psud.fr/>) est le centre d'opérations et de données pour les missions spatiales solaires, mis en place en 1996 par le CNES, l'INSU et l'Université Paris-Sud, dans le cadre de la mission SoHO. Il a depuis accueilli les données d'autres missions, dont STEREO, TRACE, PICARD et SDO.

MEDOC est un pôle thématique de physique solaire, d'après la convention actuelle entre ses membres fondateurs, et est ainsi un outil au service de la communauté scientifique. C'est aussi un service d'observation INSU-AA ANO5. Il fonctionne en synergie avec le centre de données IDOC (OSUPS), dont il est une des composantes.

Les objectifs de MEDOC incluent l'identification de jeux de données d'intérêt pour la communauté scientifique, leur collecte et mise en forme, leur archivage, et la mise à disposition de ces données et de services et d'outils permettant d'optimiser l'interprétation des données. Ils incluent également la participation à des campagnes d'observations et aux opérations des instruments, l'organisation d'ateliers scientifiques, et enfin la communication et la diffusion des connaissances.

Faits marquants

Depuis 2014, en plus de l'ajout des nouvelles données des missions en activité, on notera l'ouverture de l'archive PICARD (dont MEDOC est l'archive pérenne pour l'ensemble des instruments), et l'inclusion d'un jeu de données supplémentaire : les données à 12min de cadence de SDO/HMI (dont les magnétogrammes vectoriels, et des données quasi-temps-réel, reçues moins de 2h après l'observation). Plus de 460 To de données d'observation sont archivés et rendus librement disponibles à MEDOC.

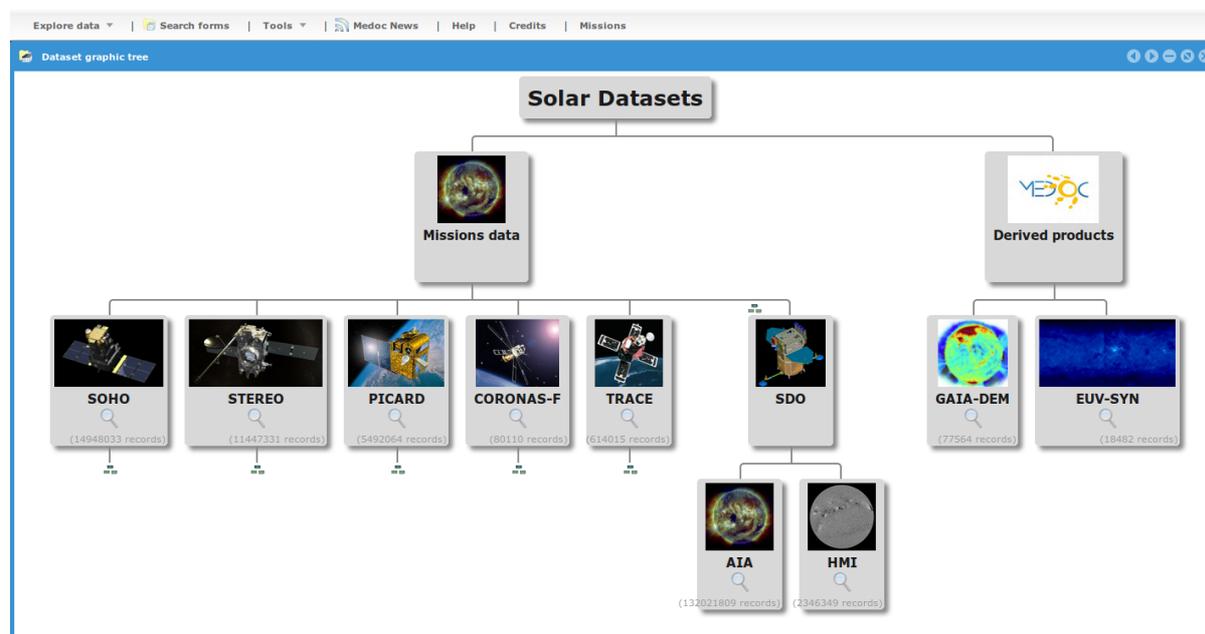


Figure 25. Jeux de données distribués par MEDOC.

MEDOC met également à disposition des produits à valeur ajoutée, créés à partir des données d'observation, dont des cartes synoptiques du Soleil en extrême UV (dérivées de SoHO/EIT) et des cartes de mesure d'émission différentielle (dérivées de SDO/AIA) qui donnent accès à une

paramétrisation de la structure thermique du plasma coronal en termes de quantités physiques (liées à la température et à la densité). Ces dernières sont recalculées quotidiennement à l'arrivée de nouvelles données. Des travaux sont en cours pour étendre ces produits à valeur ajoutée (par exemple cartes synoptiques dérivées de STEREO/SECCHI) et pour en créer de nouveaux. Des résultats de simulations numériques (simulations hydrodynamiques du vent solaire par le code VP, et simulations MHD d'une éruption solaire par le code OHM) sont aussi accessibles par MEDOC, ainsi que des codes de transfert de rayonnement en UV.

Les données d'observation et les produits à valeur ajoutée sont disponibles grâce à plusieurs interfaces. Elles sont désormais pour la plupart rassemblés dans une nouvelle interface unique, à <http://idoc-medoc.ias.u-psud.fr/>, ouverte à la communauté début 2018. Des clients IDL et Python ont été développés pour permettre d'accéder à certains jeux de données de façon automatisée, ce qui permet des traitements systématiques sur de grandes quantités de données. De plus, la plupart des jeux de données d'observation peuvent être visualisés grâce au système *HelioViewer*, dont une instance du serveur et un miroir complet des données sont installés à MEDOC. Ceci permet de voir et de combiner les données de différents instruments, par le client Java *JHelioViewer* ou par l'application web <http://heliviewer.ias.u-psud.fr/>, véritable "Google Maps" du Soleil.

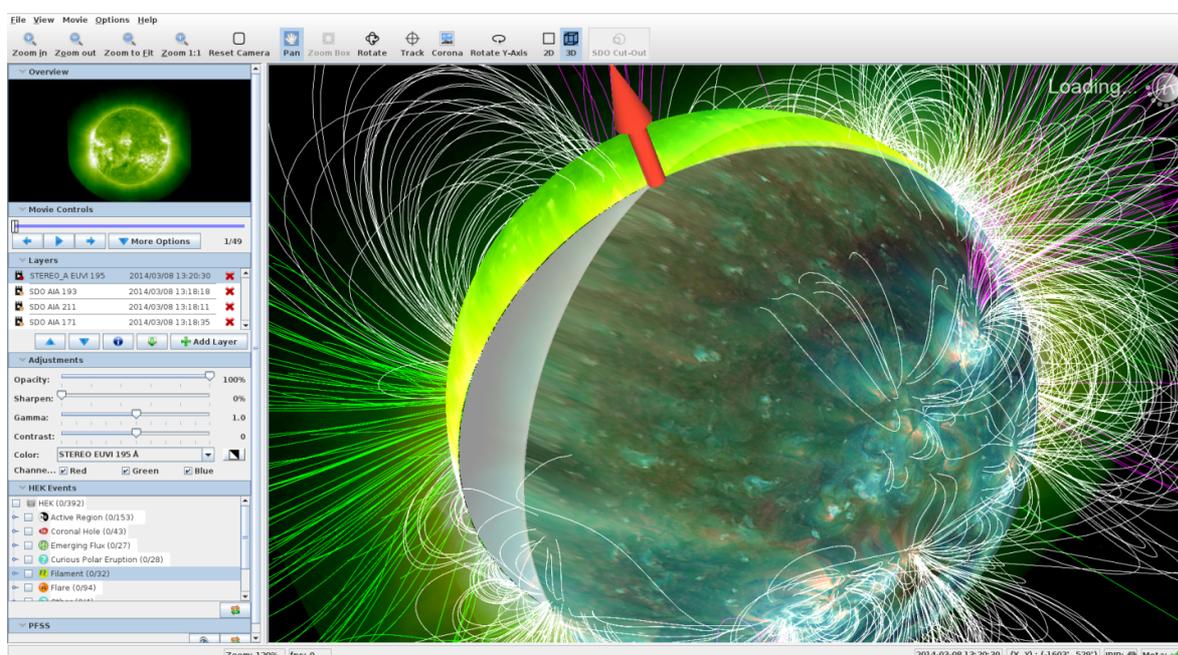


Figure 26. Visualisation d'images en EUV et de lignes de hamp magnétique extrapolées.

Collaborations et projets

L'objectif du projet européen FLARECAST (H 2020, 2015-2018) était de développer un système de prévisions d'éruptions solaires en temps réel, basé sur de l'apprentissage automatique sur les magnétogrammes de SDO/HMI. MEDOC a fourni l'infrastructure et les données utilisées par le projet. MEDOC héberge le système d'extraction des propriétés des régions actives (dérivées des magnétogrammes et utilisées comme prédicteurs d'éruptions) et d'apprentissage automatique et les bases de données correspondantes. MEDOC prévoit de maintenir opérationnels le système et l'interface de prévision d'éruptions, qui sont en cours de finalisation.

La stratégie de collaboration et de rapprochement avec les partenaires naturels que sont BASS2000 et le CDPP se poursuit. Des services d'Observatoire Virtuel, interopérables, sont en développement, ce qui permettra aux autres bases de proposer un accès aux jeux de données concernés à MEDOC.

MEDOC collabore avec BASS2000 pour la pérennisation du *Heliophysics Feature Catalogue* issu du projet FP7 HELIO, et pour son alimentation par des catalogues de structures détectées dans les données de MEDOC. MEDOC fournit des données pour le CDPP et ses outils, notamment le *Propagation Tool*, afin de permettre de relier les événements héliosphériques aux événements solaires. MEDOC prévoit par ailleurs de fournir de nouveaux produits utiles à la météorologie de l'espace dans le cadre du programme *Space Situational Awareness* de l'ESA, et s'implique dans le couplage entre observations et simulations, notamment dans le cadre de l'Initiative de Recherche Stratégique SPACEOBS de l'Université Paris-Saclay.

Ces collaborations ont vocation à se renforcer dans le cadre de la mission *Solar Orbiter*, dont les objectifs scientifiques nécessitent de comprendre la connexion entre les événements solaires, observés à distance (MEDOC et BASS2000), et les événements héliosphériques, observés in-situ (CDPP). Les données archivées, le produit à valeur ajoutée et les outils de ces bases permettront à la fois de préparer les observations de *Solar Orbiter* et de faciliter leur exploitation scientifique et leur valorisation.

ISGI – International Service of Geomagnetic Indices

Le Service International des Indices Géomagnétiques est le service de référence de l'IAGA (*International Association of Geomagnetism and Aeronomy*). ISGI est en charge de la validation, la diffusion et la préservation des indices d'activité magnétique et des tables d'événements magnétiques remarquables, au travers de son portail Web officiel (<http://isgi.unistra.fr>). ISGI est un service international opérationnel pour la météorologie de l'espace, ses produits de données sont largement utilisés pour décrire en temps réel de manière condensée, mais efficace, la géo-effectivité des événements d'origine solaire dans la magnétosphère, l'ionosphère et jusqu'à la surface de la Terre.

Les produits de données, formellement labellisés par IAGA et gérés par ISGI, sont basés sur les rapports d'observatoires magnétiques répartis sur toute la planète et calculés par les 6 Instituts Collaborateurs d'ISGI (*Figure 27*). ISGI a, par ailleurs, un rôle fort de conseil et d'expertise auprès des autres membres de IAGA et auprès de la communauté internationale pour tout ce qui concerne les indices d'activité magnétique. Ce rôle est important du fait des changements profonds introduits par l'évolution des moyens de transfert temps-réel des données. Le rôle d'expertise de ISGI est, par exemple, central dans le processus de labellisation IAGA de nouveaux indices géomagnétiques.

An niveau français, ISGI est un service national d'observation (SNO) ayant la double labellisation : Terre Interne (ANO Magnétisme) et Astronomie-Astrophysique (ANO6 Surveillance du Soleil et de l'environnement spatial de la Terre).

Faits marquants 2014-2019

ISGI était placé, depuis 1987, sous la direction de Michel Menvielle (CETP puis LATMOS-IPSL/OVSQ). L'année 2014 fut une période charnière puisqu'ISGI a vu son hébergement et sa direction changer. En effet, à compter du dernier trimestre 2014, ISGI a été hébergé par l'Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre (EOST) à Strasbourg sous la direction de Aude Chambodut. Ces changements ont été opérés de façon concertée, avec un chevauchement et une passation progressive des responsabilités.

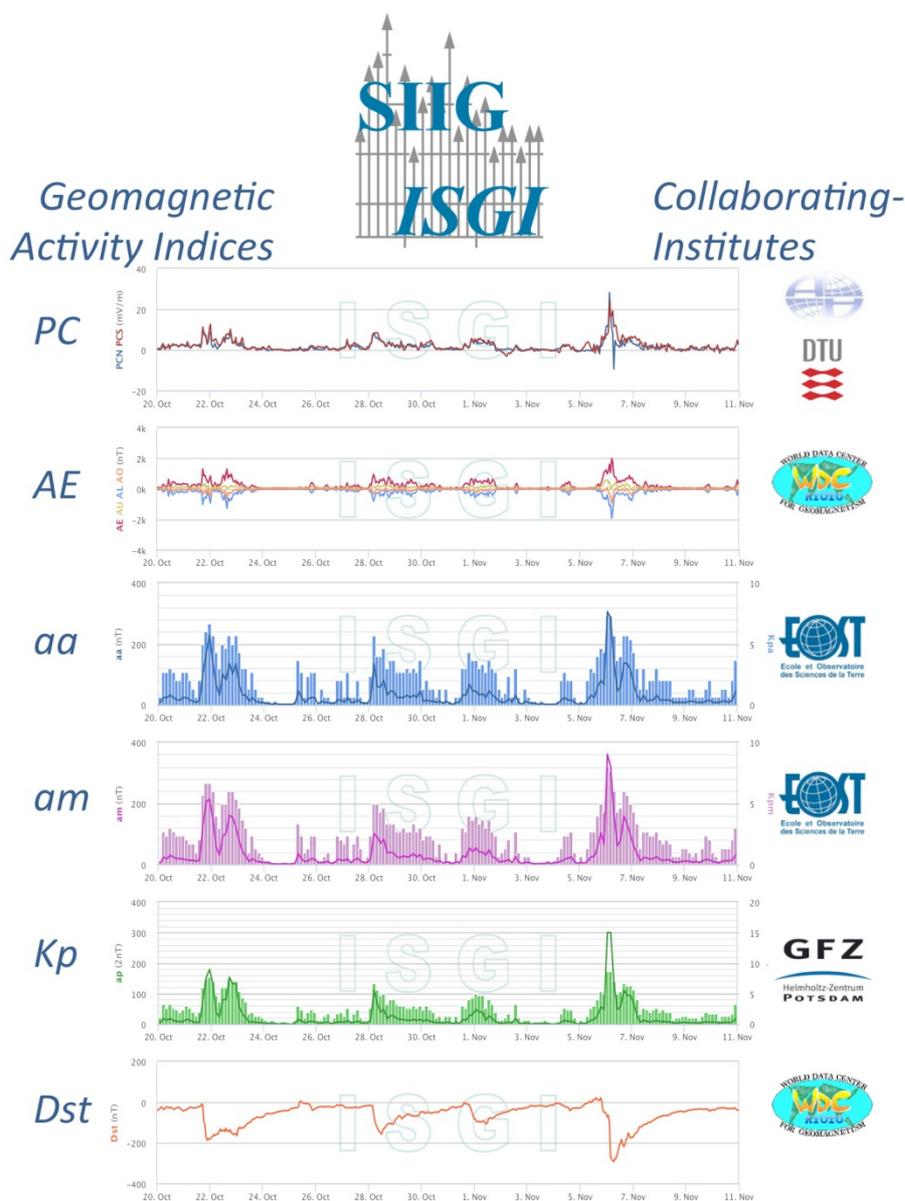


Figure 27. Service ISGI. De haut en bas: variation des indices d'activité magnétique des zones polaires (PC), aurorale Nord (AE), sub-aurorales (aa, am, Kp) et équatoriale (Dst) du 20 octobre au 11 novembre 2001. Les logos des ISGI-Collaborating-Institutes sont indiqués à droite.

Le site Web du service a dans ce contexte subi une refonte totale tant du point de vue organisationnel que structurel. Un cahier des charges strict a permis de répondre à l'état de l'art international en matière de protocoles de transferts comme de mise à disposition des données (*Workflows, Data Management Plan, méta-données, référencement, certification ICSU-WDS, Web Services...*).

ISGI fournit l'accès permanent : aux indices d'activité magnétique et listes d'évènements remarquables reconnus par IAGA ; mais également à de nouveaux indices géomagnétiques non reconnus par IAGA afin que la communauté scientifique puisse avoir un accès privilégié à ces nouveaux produits et en évaluer l'intérêt.

Quel que soit le produit, les données les plus abouties (dans l'ordre décroissant de qualité : *definitive, provisional* et *quick-look*, selon les dates des requêtes) sont mises à disposition associées à leurs

métadonnées dans des formats unifiés, soit via le site web (interface humaine), soit via *WebService* (interface machine).

Perspectives 2019-2023

ISGI va poursuivre son action au sein de IAGA et des communautés utilisatrices (interne - Terre Solide comme externe – Astronomie/astrophysique) des indices d'activité magnétique. Du point de vue scientifique, les développements et études de nouveaux indices d'activité magnétique avec de meilleures résolutions spatiale et temporelle seront poursuivis. Les collaborations au sein de la communauté PNST seront poursuivies, par exemple avec le CDPP pour une alimentation régulière de l'outil AMDA en indices d'activité magnétique.

Le réseau des observatoires magnétiques français; Le BCMT

Le Bureau Central de Magnétisme Terrestre (BCMT, www.bcmt.fr) est un des services nationaux d'observation en géomagnétisme de l'INSU. Sa fonction est de collecter, préserver et distribuer les observations magnétiques au sol dans le but d'établir des séries de mesures consistantes sur de grandes échelles de temps. Pour cela ce service a mis en place et maintient un réseau de 18 observatoires magnétiques dans le monde, incluant l'observatoire national magnétique français à Chambon-la-Forêt. Le BCMT fait partie d'une organisation internationale INTERMAGNET qui impose des procédures de qualité pour la mesure et la calibration des données magnétiques. En particulier, la calibration des données impose une intervention, au minimum hebdomadaire, sur le site de chaque observatoire, afin d'effectuer une mesure absolue manuelle instantanée de la direction du champ magnétique local. D'un point de vue structurel, le BCMT possède un "Conseil Scientifique International" qui se réunit tous les deux ans. Il évalue le travail fait, suggère des actions si nécessaire et valide la stratégie d'évolution du service.

Le BCMT a été créé et reste principalement orienté vers le suivi des variations du champ principal terrestre, et donc vers la communauté Terre interne. Il participe ainsi significativement à la mise en place de modèles internationaux de référence tels que l'*International Geomagnetic Reference Field* (IGRF), qui est utilisé dans un grand nombre d'applications liées à la météorologie de l'espace. Néanmoins, des efforts ont été faits au sein du BCMT pour collecter des données utiles pour la communauté Astronomie-Astrophysique (ANO6). En particulier le BCMT :

- fournit des données 1 Hz qui suivent efficacement la géoeffectivité au sol des événements solaires (les variations du champ géomagnétique au sol dues aux systèmes de courants dans la magnétosphère),
- distribue les données en temps quasi-réel,
- alerte automatiquement lors de l'occurrence de brusques sauts dans les données magnétique sol (*Sudden Commencement* – SC ; liés à la compression de la magnétosphère causée par une forte augmentation de la pression dynamique du vent solaire, suivie ou non d'un orage magnétique).

Le BCMT est donc déjà un service d'observation opérationnel pour des applications de type « météorologie de l'espace ». Il contribue aux centres internationaux comme la NOAA, et distribue de données vers des organismes tels que l'armée de l'air française. La couverture très large du réseau d'observatoire (voir *Figure 28*) et son fonctionnement en continu en font un outil efficace pour caractériser l'état global de la magnétosphère en temps quasi-réel. Les données apportent aussi une information importante sur la réponse de l'ionosphère à des événements solaires.

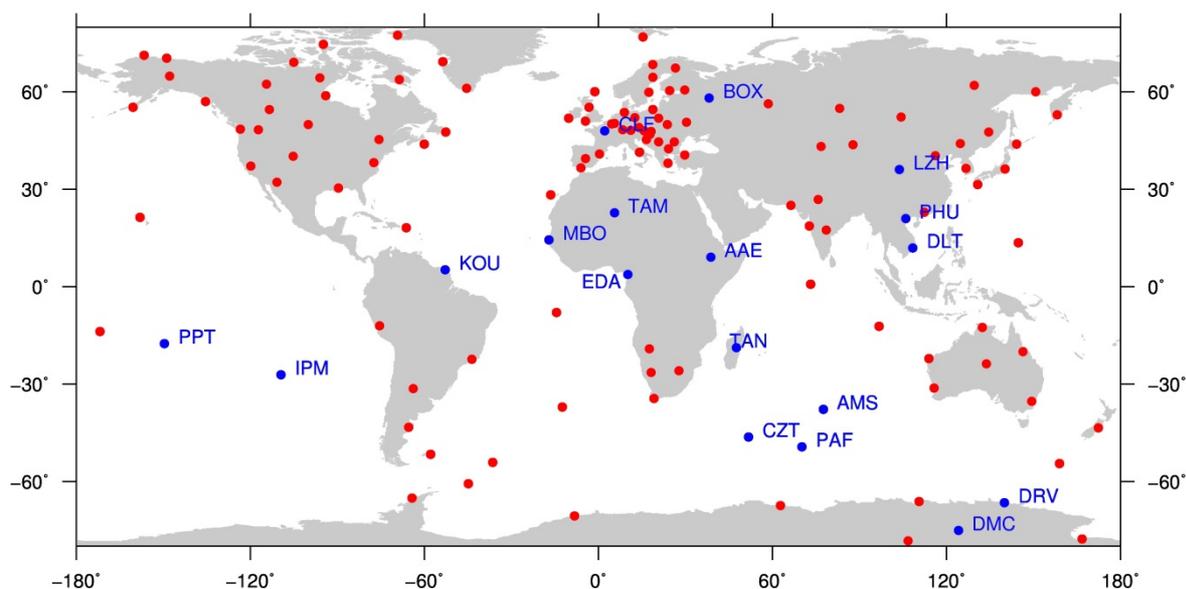


Figure 28. En rouge : ensemble des observatoires magnétiques du réseau INTERMAGNET. En bleu : les observatoires du BCMT.

BASS2000

BASS2000 a été créée avec deux centres, un à Tarbes pour les observations à haute cadence (notamment THEMIS, mais aussi Radiohéliographe de Nançay), l'autre à l'Observatoire de Paris (Meudon) pour des observations "Soleil entier" à faible cadence temporelle. BASS2000 Tarbes a été délabellisé, à sa demande, par l'INSU en 2016.

La base de données soleil entier BASS2000, située à l'Observatoire de Paris, est l'un des services labellisés de PADC (Paris Astronomical Data Centre). Elle propose aux utilisateurs des jeux de données (spectrohéliographe, héliographe, tour solaire pour Meudon ; radiohéliographe et réseau décimétrique de Nançay, quelques images quotidiennes pour chaque longueur d'onde de l'instrument CLIMSO du Pic du Midi, observations du spectrohéliographe de Coimbra au Portugal, observations de la lunette USET de l'Observatoire Royal de Belgique à Bruxelles) ainsi que des plus-values (éphémérides solaires, cartes synoptiques de l'activité, spectre solaire de ≈ 60 nm à 5000 nm avec identification des raies, base de données de structures solaires depuis 1996 pour certaines grâce à des outils de détection automatique, le HFC, créé à l'origine dans le cadre du projet européen HELIO).

Faits marquants 2014-2019

Les évolutions menées durant la période 2014-2019 dans BASS2000 sont les suivantes :

- Utilisation de services OV (Observatoire Virtuel) :
- IMCCE Miriade : Calcul des éphémérides et affichage de la grille solaire
- VAMDC : Affichage des informations de physique atomique sur les raies du spectre solaire
- Nouvelle version de l'affichage du spectre solaire plus réactive

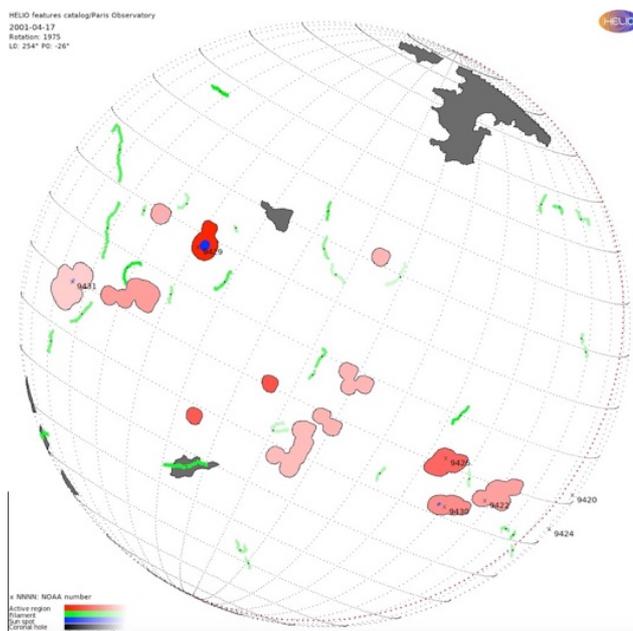


Figure 29. BASS2000. Détection automatique de filaments, régions actives, taches solaires et trous coronaux le 17 avril 2001.

- Numérisation et intégration des données synoptiques anciennes (depuis mars 1919), cartes et tables de description des filaments utilisés pour ces cartes (Figure 29)
- Interaction directe BASS2000/HFC permettant d'effectuer des recherches aussi bien sur les structures historiques disponibles dans BASS2000 que dans les plus récentes du HFC.
- Ajout d'une section HFC sur la page d'accueil comprenant les structures solaires les plus récentes du HFC
- Ajout des données SPECTROCAM du spectrohéliographe de Meudon
- Migration de la base de données, du serveur FTP et des services Web sur les serveurs communs du LESIA
- Création d'une adresse de contact générique bass2000.contact@obspm.fr
- Création de l'interface OV EPN-TAP http://voparis-tap-helio.obspm.fr/_system_/dc_tables/show/tableinfo/bass2000.epn_core permettant d'accéder aux données de BASS2000 par des outils OV, comme VESPA, développé par le projet européen EuroPlaNet.
- Archivage des données anciennes du télescope THEMIS, auparavant distribuées par BASS2000 Tarbes.
- Un gros travail d'homogénéisation des codes de détection automatique de structures solaires et d'optimisation de l'accès aux données se termine. Prospective 2019-2023

Environ 120 000 pages sont visitées chaque mois pour le site web, et 700 visites mensuelles se font en plus sur le ftp de BASS2000. Le volume de données transférées (les images font quelques Mo seulement) est de l'ordre de 24 Go par mois pour le web et autant pour le ftp. Les utilisateurs proviennent de France, USA, Europe, Canada, Allemagne, Belgique, Russie, Italie, Portugal principalement.

Perspectives 2019-2023

La nouvelle situation qui fait de BASS2000 à l'Observatoire de Paris la seule base de données solaires en France, nécessite de reconcevoir son fonctionnement. Pour la période qui vient, des évolutions majeures sont prévues, permettant entre autres la requête et l'accès à des données à haute

résolution (comme METEOSPACE, par exemple), l'intégration des spectro-héliogrammes anciens dans la base, un interfaçage repensé avec les observations radio de Nançay, et des échanges de plus-values avec le site SSA de l'ESA.

En 2019, BASS2000 et trois services d'observations labellisés en ANO6 (CERCLe, Spectrohéliogrammes de Meudon, Radiohéliographe de Nançay) ont demandé une labellisation conjointe, avec l'objectif d'améliorer l'utilisation des ressources par un fonctionnement coordonné et d'accroître la visibilité en tant que service de surveillance solaire.

APIS

Les émissions aurorales planétaires offrent un diagnostic riche des magnétosphères planétaires et de leur couplage avec l'ionosphère et les satellites d'une part et avec le vent solaire de l'autre. Les fronts de pression dynamique induisent par exemple des compressions magnétosphériques responsables d'orages auroraux et/ou d'émissions de cornet polaire, qui offrent en retour un traceur performant des chocs interplanétaires (CIRs et CMEs) dans l'héliosphère externe. Le service APIS <http://apis.obspm.fr/> offre un accès à des données de spectro-imagerie aurorale planétaire de haut niveau facilement manipulables dans le cadre de l'Observatoire Virtuel (OV; Lamy et al. 2015). Il a été ouvert à la communauté en juillet 2013, puis labellisé ANO5 par l'INSU en 2016. APIS consiste en une base de données interne calculée à partir des observations UV Hubble (>6500 images et spectres HST des planètes géantes et de leurs satellites depuis 1997) et interroge depuis 2017 une base de données externe d'observations UV du satellite japonais *Hisaki* (~1300 observations de spectro-imagerie au long cours des planètes du système solaire depuis 2013). Ces données peuvent être interrogées avec l'interface de recherche dédiée et utilisées en ligne à l'aide d'outils OV interactifs (Aladin, Specview, Cassis). Le format EPN-TAP de la base HST a également permis d'interconnecter APIS avec d'autres services distants (comme les outils AMDA, 3DView et PropTool du CDPP ou le portail VESPA) (Erard et al. 2018, Génot et al. 2017). APIS est hébergé à *Paris Astronomical Data Centre* (PADC) de l'Observatoire de Paris.

CDPP

Le CDPP (Centre de Données de la Physique des Plasmas <http://www.cdpp.eu/>, 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 grâce à une action coordonnée entre le CNES et l'IRAP (serveurs SIPAD et AMDA respectivement). Le CDPP offre également des services de visualisation, de recherche et d'analyse sur ces données en particulier en lien avec de nombreux modèles et simulations. Le CDPP a été labellisé comme Pôle national de distribution des données de physique des plasmas (ANO5/ANO6), une labellisation confirmée en décembre 2016. Par ailleurs le CDPP est un service de référence associé au centre d'expertise régional OV-GSO (Observatoire Virtuel Grand Sud-Ouest <https://ov-gso.irap.omp.eu/doku.php>).

Faits marquants 2014-2019

Mise à disposition des données plasma de Rosetta : Sur la période 2014-2016 le CDPP a permis aux équipes instrumentales des cinq instruments de Rosetta (Rosetta Plasma Consortium) d'accéder à leurs données à travers une base unique afin de les comparer et de les inter-calibrer. Ceci a été possible à travers AMDA qui autorise des accès restreints ou public selon les groupes d'utilisateurs.

AMDA a été fortement sollicité par les Co-I de RPC pendant cette période et plusieurs dizaines de papiers ont remercié les efforts du CDPP (Figure 30).

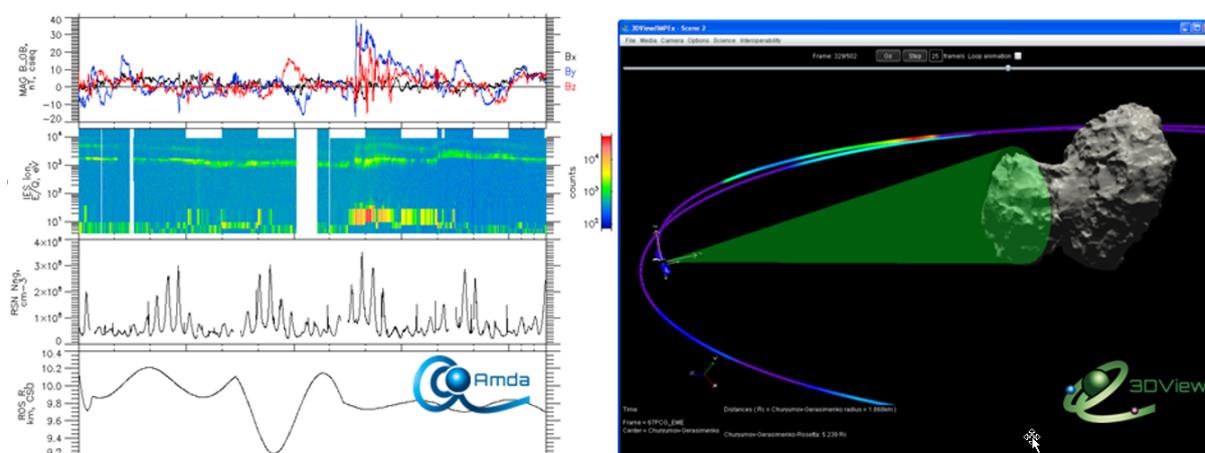


Figure 30. Données Rosetta/RPC visualisées simultanément dans AMDA et 3DView.

Refonte des accès aux données : Le site de l'archive pérenne au CNES (SIPAD) offre désormais une interface en adéquation avec celles d'AMDA et du serveur CDPP qui ont eux aussi évolué. Les données d'AMDA peuvent maintenant être commandées directement depuis le site de l'archive. Des évolutions majeures d'AMDA et du SIPAD interviendront de nouveau en 2018/2019. En particulier, la migration de l'archive vers l'outil REGARDS s'accompagnera d'une évolution du modèle de données pour le rendre conforme au standard SPASE.

Implication dans les projets européens : Après quatre ans de collaboration, le projet IMPEx a abouti en 2015 en mettant en relation des simulations et modèles du LATMOS, FMI, et SINP avec les données du CDPP à travers les outils AMDA et 3DView. C'est aussi en 2015 que le CDPP s'est impliqué dans le projet *Europlanet-RI* qui a permis une plus grande diffusion des données du CDPP (portail VESPA) ainsi que la valorisation de plusieurs modèles grâce à *Planetary Space Weather Services* (voir section suivante).

Diversification des outils d'analyse : Le CDPP a étoffé son offre d'outils d'analyse dans plusieurs directions. *3DView* (<http://3dview.cdpp.eu/>) s'est enrichi d'un module de recherche de conjonctions ionosphériques ainsi que d'un ensemble de modèles analytiques notamment pour préparer *Solar Orbiter*; ses web-services de changement de repères ont été exposés grâce à l'outil TREPS (<http://treps.cdpp.eu/>). Le *Propagation Tool* a été développé et largement exploité notamment dans le cadre du projet FP7 HELCATS (voir section sur STORMS). Enfin, deux services permettent maintenant d'exploiter un modèle de prévisions des conditions du vent solaire aux planètes (<http://heliopropa.irap.omp.eu/> Tao et al.) et de lancer des simulations à la demande pour les conditions ionosphériques (<http://transplanet.irap.omp.eu/> Marchaudon & Blelly).

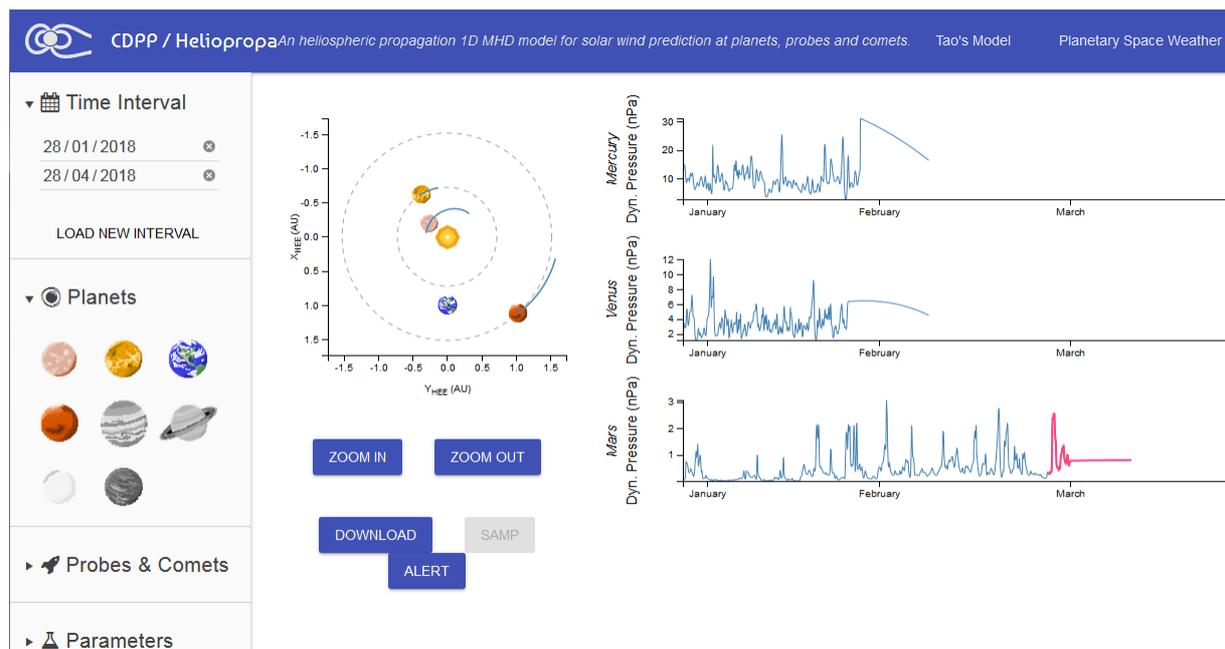


Figure 31. Interface d'HelioPropa de prévision des conditions de vent solaire aux planètes (prédiction en rouge).

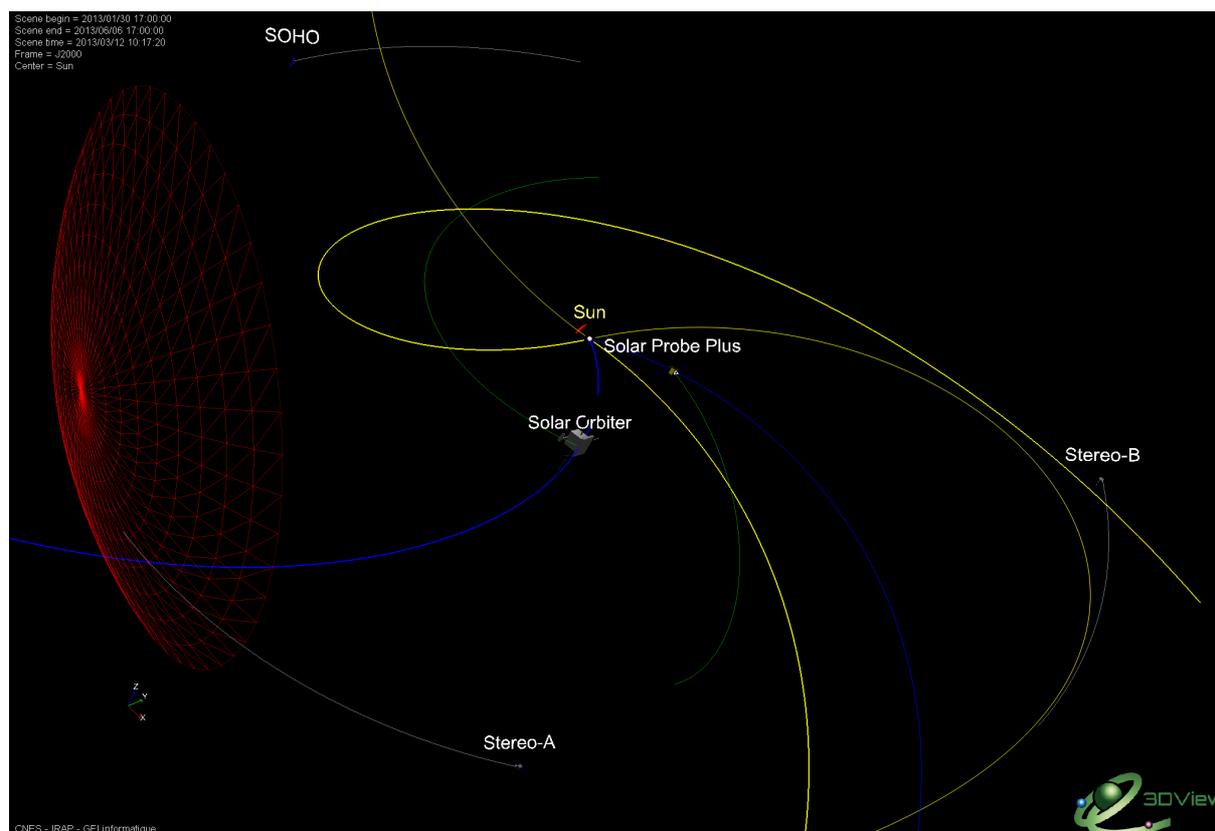


Figure 32. Sondes héliosphériques et modèles de ligne de champ magnétique et d'éjections coronales de masse dans 3DView.

Implication dans le programme *Space Situational Awareness (SSA)* de l'ESA : La France a réintégré le SSA dans sa période 3. Le CDPP (et MEDOC) y seront visibles avec des développements en modélisation pour prédire les conditions héliosphériques et ionosphériques. Dans sa période 2 le CDPP a aussi participé à la mise à disposition de ces outils AMDA et *Propagation Tool* à travers le portail SSA Heliospheric Weather (<http://swe.ssa.esa.int/heliospheric-weather> , *Figure 33*).

The screenshot shows the ESA SSA Heliospheric Weather portal. At the top, the ESA logo and 'space situational awareness' are displayed. Below the navigation menu, the main content area features the 'Propogation Tool' logo and the text 'Federated products from the Centre de Données de la Physique des Plasmas (CDPP)'. The title 'Heliospheric Weather Expert Service Centre - Propagation Tool' is prominently displayed. The main text describes the tool's purpose: 'The CDPP Propagation Tool allows users to track solar storms, streams and energetic particles in the heliosphere.' It lists main functionalities and user capabilities, such as propagating solar eruptions (CMEs), corotating structures (CIRs), and solar energetic particles (SEP). A 'Launch the Propagation Tool' button is visible. The footer includes logos for CNRS, cnes, Université Toulouse III Paul Sabatier, gfi, and eur@PLANET.

Figure 33. Portail du SSA Heliospheric Weather de l'ESA présentant l'outil Propagation Tool.

Soutien à la mission de classe L de l'ESA d'astronomie X ATHENA : Son lancement, vers 2030, est prévu pour une orbite autour de L2. Le consortium d'ATHENA a fait appel au CDPP pour caractériser l'environnement autour de L2 et en particulier les flux d'ions de 40-400 keV qui sont une source de bruit critique pour l'un des deux instruments, X-IFU (*Figure 34*). Cette étude a été réalisée en collaboration avec l'APL (*Applied Physics Laboratory, JHU, USA*) dans le cadre du projet AREMBES de l'ESA et étendue à la caractérisation de l'environnement autour de L1 en s'appuyant sur des expertises présentes au sein du service STORMS. Les résultats de cette étude pourraient amener à placer l'orbite d'ATHENA autour de L1 plutôt qu'autour de L2.

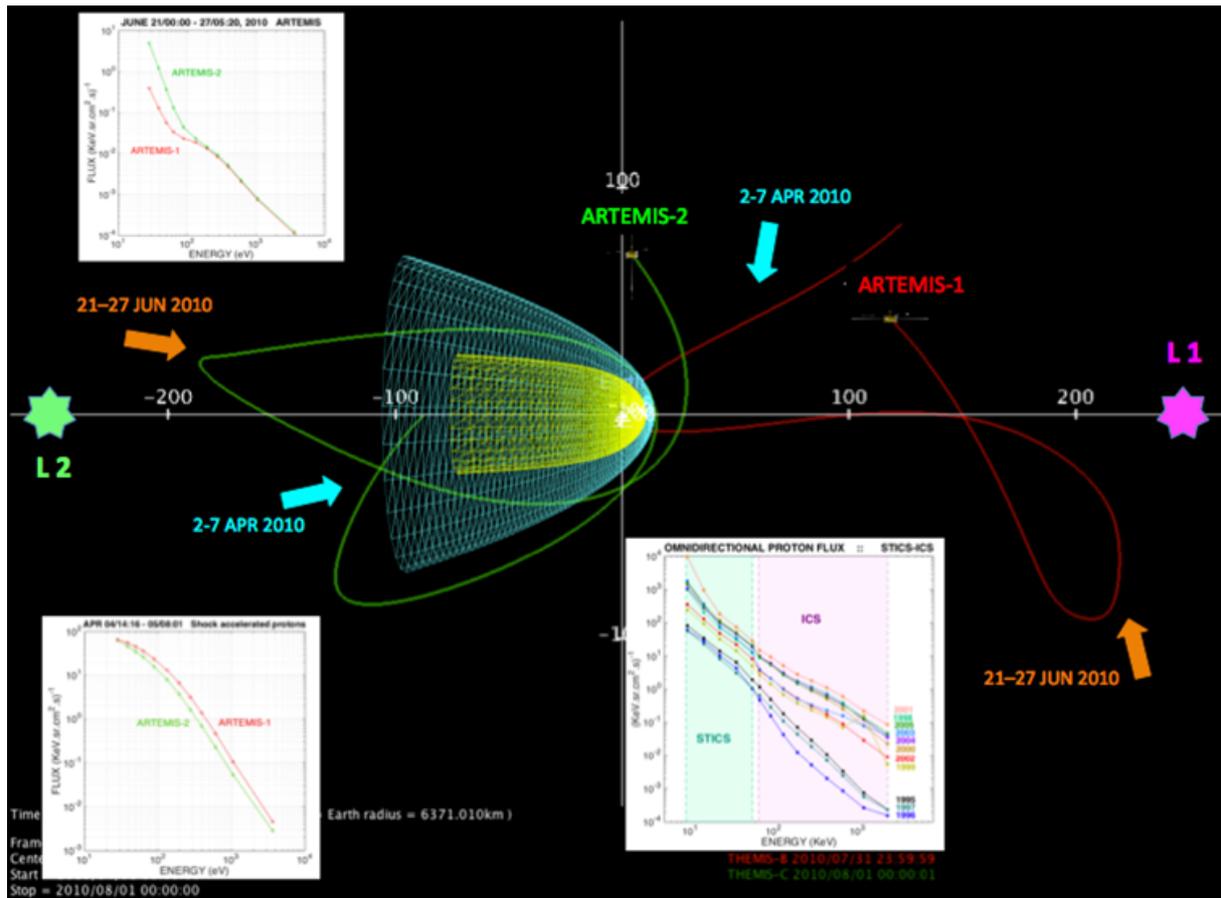


Figure 34. Caractérisation des environnements L1 et L2 à partir des données plasma Artemis.

Perspectives 2019-2023

Le CDPP va poursuivre son action en se focalisant d'abord sur le lancement de la nouvelle version d'AMDA. Un axe de développement consistera par ailleurs à accroître l'intégration des outils CDPP entre eux, avec ceux de l'IVOVA ainsi que de les rendre visibles à travers les portails ESA/SSA, ESAC/PSA, EuroPlanet-RI/VESPA et PSWS. Enfin, un autre axe prioritaire concernera la préparation de l'accès aux données des prochaines missions (*BepiColombo*, *Solar Orbiter*, *JUICE*). La mise en œuvre de l'outil REGARDS pour l'archive du CDPP permettra son ouverture via des web-services plus évolués et la mise en œuvre d'interfaces de type OV.

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 MEDOC et CDPP, mais aussi des services plus spécialisés et d'autres ressources nationales. 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.

Les réussites d'IMPEx et d'*Europlanet* ont permis aux outils AMDA et 3DView d'être visibles et de se développer. Ces projets ont accru les connaissances OV du CDPP (modèles de données, web services, protocoles) qui a accédé à une compétence pour un nouveau type de données : les simulations et modèles. Les missions *Solar Orbiter* et *Parker Solar Probe* et plus généralement les missions planétaires nécessiteront en effet un soutien important en simulation pour l'analyse des données.

IPODE

La base de données IPODE (*Ionizing Particle Onera Data basE*) de l'ONERA est dédiée aux particules énergétiques (électrons et protons) des ceintures de radiations. IPODE dispose de mesures de plus d'une centaine de couples satellite/instrument depuis les années 1970 jusqu'à nos jours ; soit une couverture temporelle de plus de quatre cycles solaires. Les mesures couvrent l'ensemble des orbites terrestres classiques (LEO, MEO, GEO, HEO; *Figure 35*).

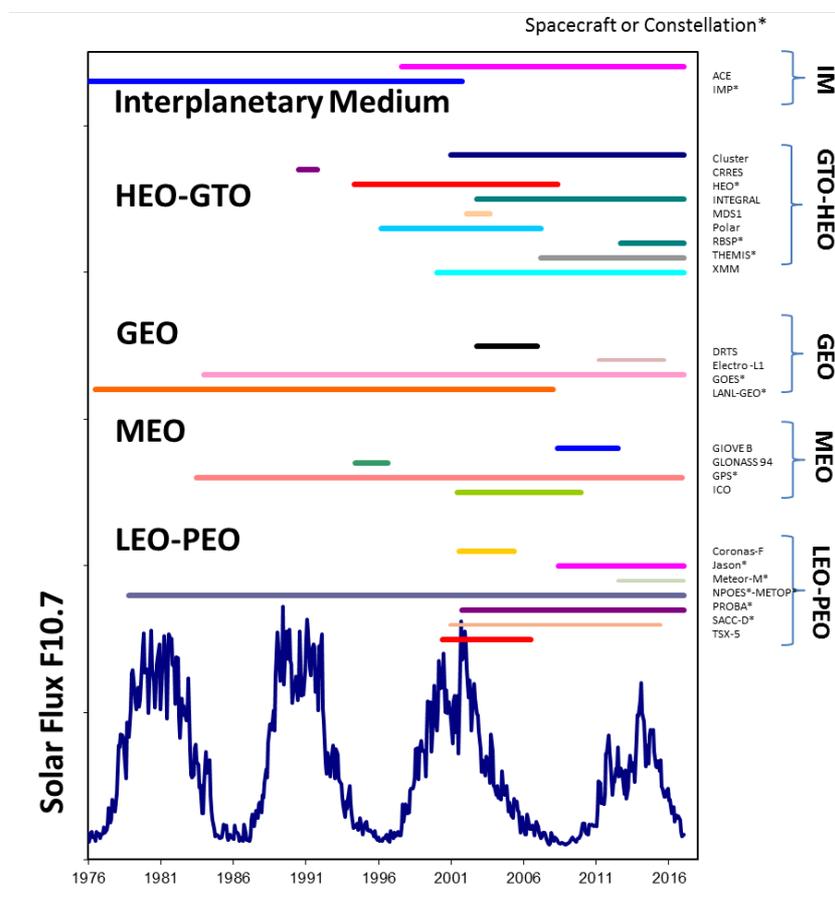


Figure 35. Couverture spatiale et temporelle d'IPODE.

IPODE est le résultat de la collecte de données à accès libre ou bien fruit de collaborations nationales et internationales (CNES, ESA, NASA, NOAA, JAXA, ...). Toutes ces données sont mises au format standard ISTP/CDF (*International Solar Terrestrial Physics / Common Data Format*).

Ces données peuvent être tracées à l'aide de l'outil IPSAT (*Ionizing Particle in Space Analysis Tool*) sur le site web du projet CRATERRE <https://craterre.onera.fr/home.html>). Le but de ce projet (*Ceintures de Radiation de la TERRE*) soutenu par le CNES, est de développer de nouveaux modèles de spécification des ceintures de radiation des électrons et protons.

Pour les missions en cours, les mesures sont mises à jour dans IPODE de manière automatique. Cette disponibilité des mesures au plus près du temps réel a permis de développer un ensemble d'indicateurs de risque d'effets vis-à-vis de l'activité de l'environnement radiatif sur des orbites typiques LEO et GEO : risque de charge de surface avec des électrons d'énergie supérieure à 30 keV, risque de charge interne avec des électrons d'énergie supérieure à 300 keV, risque d'effet singulier avec des protons d'éruptions solaires d'énergie supérieure à 70 MeV. Ce risque est calculé de manière quotidienne et traduit sous la forme d'un indicateur sur une échelle allant de 1 (pour une activité 'calme') à 4 (pour une activité 'extrême'). La page d'entrée du site CRATERRE présente l'historique de quelques indicateurs en LEO sur le dernier mois écoulé (Figure 36).

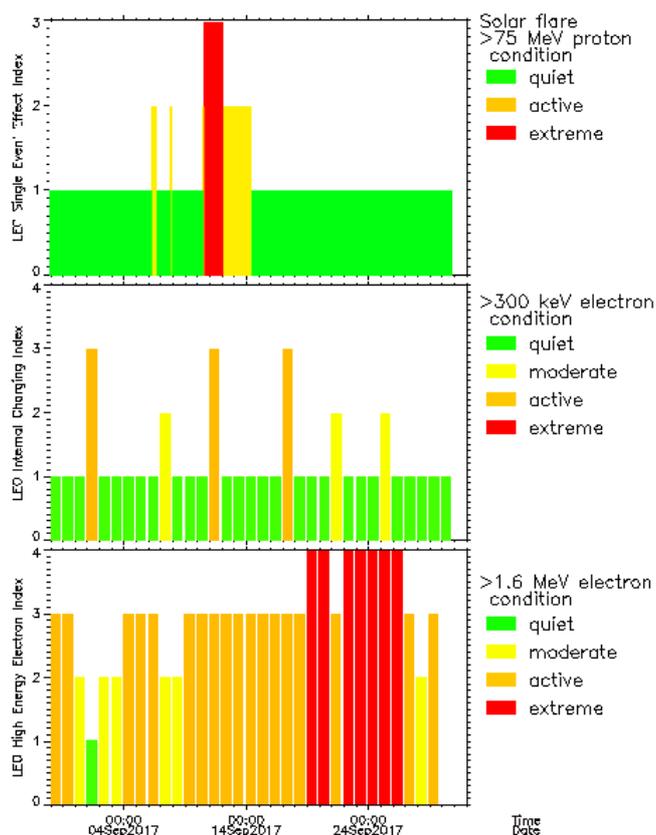


Figure 36. Historique d'indices observés sur le site CRATERRE en Septembre 2017.

Outils numériques

Les outils numériques prennent une part croissante dans les activités de recherche du programme et sont souvent indissociables de l'exploitation des opportunités qu'offre l'amélioration des outils d'observation. Leur utilisation scientifique est décrite dans les chapitres précédents. Nous donnons en *Annexe 2: Codes numériques* une liste des codes développés dans ou utilisés par la communauté PNST, en distinguant les codes de modélisation et simulation numérique, d'analyse des données et de transfert radiatif.

Les ressources utilisées varient beaucoup selon la nature des codes, les simulations numériques lourdes (par exemple MHD 3D ou cinétique) nécessitant l'utilisation de moyens spécifiques (GENCI par exemple) via des appels d'offre nationaux ou européens (PRACE par exemple).

Interfaces avec les autres programmes nationaux de l'INSU

PNP

L'étude des enveloppes ionisées des planètes et de leurs satellites forme le cœur des thèmes de recherche à la croisée du PNST et du PNP. Les résultats scientifiques obtenus sur les plasmas planétaires ont été détaillés par thématique scientifique dans les chapitres précédents. La collaboration PNST/PNP est naturelle et productive, elle porte sur le sujet de projets de recherche et inclut des manifestations scientifiques communes. Un conseiller est commun aux CS des deux programmes. Le PNP a été présenté par son directeur au colloque à mi-parcours du PNST en 2016.

Soutien conjoint PNST/PNP de projets de recherche: Trois équipes de recherche (LESIA, LATMOS, IPAG) ont demandé un financement récurrent conjoint PNST/PNP lors de l'exercice précédent sur deux thématiques que sont l'étude des magnétosphères terrestre et l'étude de la haute atmosphère de Mars. L'étude individuelle et comparée des environnements magnétisés et ionisés des objets du système solaire est un thème récurrent à l'interface entre PNST et PNP qui repose sur les observations à distance et *in situ* de missions d'exploration spatiales (*Cassini*, *Juno*) ou d'observatoires terrestres (Réseau décimétrique de Nançay, les télescopes IR sol, Hubble), de travaux théoriques et de simulations. Les questions abordées incluent la caractérisation de la structure et de la dynamique des magnétosphères, les processus d'accélération du plasma, les mécanismes de génération d'émissions radio aurorales basse fréquence, avec des applications dans la recherche en provenance d'exoplanètes, et des aurores atmosphériques qui diagnostiquent les régions actives de la magnétosphère et son couplage avec l'ionosphère, le vent solaire et d'éventuelles lunes.

Manifestations scientifiques: Le PNST, le PNP et le PNPS ont organisé [un atelier commun à la SF2A](#) à Paris en 2014 sur le thème des interactions étoile-planète, qui a rassemblé une quarantaine de participants. L'étude des magnétosphères planétaires par la communauté française a fait l'objet d'un [atelier soutenu par le PNST et le PNP organisé à Meudon en 2015](#), qui a concerné une cinquantaine de participants.

Perspectives : La communauté à l'interface PNST/PNP est fortement mobilisée autour de l'instrumentation plasma (radio, particules, spectromètre de masse) et de spectro-imagerie (UV) des futures missions ESA vers les planètes du système solaire: BepiColombo, préparation de JUICE, prospective sur une mission d'exploration d'Uranus ou Neptune, qui est toujours à l'étude au niveau européen (suite du projet de mission Uranus Pathfinder) et fait l'objet de discussions ESA/NASA.

PNPS

L'observation et la modélisation de la variabilité magnétique des étoiles sont les pierres angulaires des liens entre le PNST et le PNPS. Plusieurs chercheurs s'intéressent à ces thématiques à la croisée des deux PNs, et les résultats principaux obtenus sont résumés ici. Au vu du nombre important de moyens consacrés à la découverte et l'étude des exoplanètes et de la nécessité de connaître et modéliser l'activité de leur étoile hôte, la quantité de données sur l'activité stellaire augmentera encore dans les prochaines années et devrait renforcer encore les liens entre le PNST et le PNPS. Le PNPS a été présenté par son directeur au colloque à mi-parcours du PNST en 2016.

Manifestations scientifiques : Une école thématique financée par les deux PNs et regroupant des

chercheurs de différents horizons, "Connexions en physique Solaire et stellaire"², a eu lieu en mai 2018 à Banyuls et a contribué à renforcer les liens entre les deux communautés. Un atelier sur l'interaction étoile-planète avait été organisé à la SF2A en 2014, avec le PNP (voir ci-dessus).

Perspectives : Les observations en spectropolarimétrie stellaire et les recherches sur l'activité d'étoiles de type solaire montrent un champ croissant de sujets à l'interface entre physique solaire et physique stellaire : les instruments ESPaDOnS et NARVAL ont apporté des résultats sur la relation entre le cycle et des paramètres comme le nombre de Rossby, la relation entre champ magnétique et activité chromosphérique, la détection de cycles. Les intérêts communs vont sans doute s'élargir avec l'avènement d'instruments puissants comme SPIROU (spectropolarimétrie) en infra-rouge ou l'exploitation et le développement de radiotélescopes puissants permettant d'accéder à l'étude de l'activité non thermique des atmosphères stellaires. C'est un champ d'interaction à développer entre PNST, PNPS et PNP.

Autres collaborations

Autour de la thématique de l'accélération des particules, le PNST interagit aussi avec le PNHE. Les énergies mises en jeu ne sont pas les mêmes, mais les processus comme l'accélération par onde de choc ou la reconnexion magnétique intéressent les deux communautés. Les deux PN ont organisé un atelier commun lors des journées scientifiques 2019 de la SF2A, et des collaborations scientifiques ont commencé à émerger.

Autour de la mission *Taranis* s'est constitué un groupe scientifique large qui comprend aussi la physique atmosphérique et la physique des hautes énergies. Le besoin de coopération dans ce domaine est clair et a conduit à proposer un GdR commun autour de l'électricité atmosphérique qui débordera du domaine INSU/AA.

Le PNST a d'autre part des échanges scientifiques avec le Pôle thématique atomes et molécules. Il a un représentant dans le comité de pilotage.

² <https://sunstars.sciencesconf.org>

Bilan administratif et financier

Périmètre du programme

Le périmètre du programme est difficile à établir, notamment si on se limite aux seules demandes de financement. Nous avons donc basé notre statistique sur les laboratoires associés aux thématiques du PNST et sur les listes des personnes ayant participé aux colloques, aux demandes financières ou ayant manifesté le souhait d'être sur la liste de diffusion.

Laboratoires associés

Laboratoires associés au PNST sont les laboratoires dont l'activité instrumentale, de modélisation ou de traitement des données relève des thématiques du PNST. La liste des principaux laboratoires contribuant à la science des relations Soleil-Terre est alors la suivante :

CEA	Saclay et Bruyères
IAP	Paris
IAS	Orsay
IPAG	Grenoble
IPGP	Paris
IPGS	Toulouse
IRAP	Toulouse
LAGRANGE	Nice
LATMOS	Guyancourt et Jussieu
LESIA	Meudon
LPC2E	Orléans
LPP	Palaiseau et Jussieu
LUTH	Meudon
ONERA	Toulouse

Ressources humaines

En nous fondant sur les informations disponibles, nous avons réévalué le périmètre du PNST en terme de personnel. Ainsi, nous avons dénombré 314 personnes qui s'inscrivent dans ce périmètre, parmi lesquelles nous avons la répartition suivante par « corps » :

Chercheurs	82
Enseignants chercheurs	21
Astronomes	29
Ingénieurs	41
Émérites	28
Thésards et Post-Doc	56
Autres	57

La catégorie « Autres » regroupe l'ensemble des personnes ayant participé aux activités du PNST, mais qui sont soit parties à l'étranger (pour un Post-Doc), soit ont quitté le domaine (retraité ou thésard ayant intégré une activité professionnelle hors recherche). La *Figure 37* traduit le tableau précédent en pourcentage par corps représentatif.

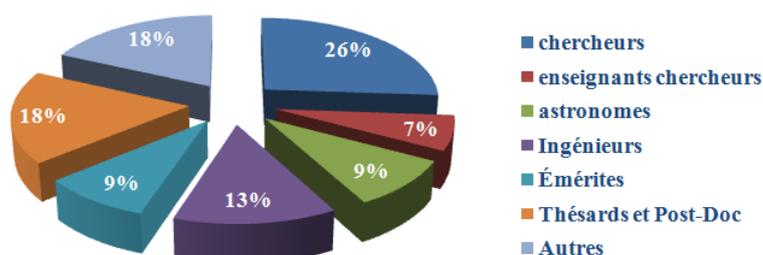


Figure 37. Distribution en pourcentage selon les différents catégories définies

Le nombre de chercheurs permanents associés au PNST s'établit donc à 132, soit 42 % des personnes. Si l'on caractérise les membres actifs du programme comme étant ceux des catégories « chercheurs permanents » et « Thésards / Post-Doc », on a alors 188 personnes actives dans le programme, représentant 60 % de la population totale.

La catégorie « Ingénieurs » est représentée significativement avec 13 % de la population. Cela est dû principalement au fait que le programme gère un nombre important d'instruments et que ces ingénieurs participent activement à leur bon fonctionnement ; ils sont d'ailleurs mentionnés dans les demandes de financement déposées auprès du programme.

La catégorie « Émérites » regroupe les chercheurs qui sont sortis de la catégorie active au cours de la période 2015-2019, mais également quelques uns qui étaient sortis précédemment. Cette catégorie pèse environ 9 % du programme et contribue clairement à son activité scientifique, ces chercheurs ayant souvent une activité réelle dans notre domaine.

Structure du programme

Conseil Scientifique

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 2015-2019, le directeur était Dominique DELCOURT (LPP) jusqu'en mai 2016, puis Pierre-Louis BLELLY (IRAP) à partir de juin 2016. Pendant cette période, le CS était présidé par Ludwig Klein (LESIA) et constitué des seize membres suivants :

AUCHERE, Frédéric	(IAS)	KOUTROUMPA, Dimitra	(LATMOS)
BOURDARIE, Sébastien	(ONERA)	KRETZSCHMAR, Matthieu	(LPC2E)
puis MAGET, Vincent		LAMY, Laurent	(LESIA)
BRUN, Allan Sacha	(CEA)	LILENSTEN, Jean	(IPAG)
CELESTIN, Sébastien	(LPC2E)	LOPEZ-ARISTE Arturo	(IRAP)
CHAUFRAY, Jean-Yves	(LATMOS)	puis PARIAT, Etienne	(LESIA)
CORBARD, Thierry	(LAGRANGE)	PITOUT, Frédéric	(IRAP)
FAUROBERT, Marianne	(LAGRANGE)	ROUILLARD Alexis	(IRAP)
ISSAUTIER, Karine	(LESIA)	SAHRAOUI, Fouad	(LPP)

Le CS du PNST se réunit deux à trois fois par an en séance plénière ou par téléconférence. En premier lieu, il se réunit afin de préparer l'appel d'offre (au printemps) et ensuite pour évaluer les réponses à l'appel d'offre et pour effectuer la répartition du budget (à l'automne). Par ailleurs, il examine la politique scientifique du programme, notamment au travers d'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 et spectrographes (Soleil, Jupiter) 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). Enfin, il fournit une expertise dans son domaine de compétences auprès des instances (CSAA) et du CNES.

Les thématiques du PNST présentent des interfaces avec d'autres programmes et des membres du CS jouent donc le rôle de correspondant auprès de ces programmes. Après les diverses évolutions du CS, actuellement seule l'interface avec le PNP est assurée au travers de J.-Y. Chaufray et L. Lamy. L'objectif est de favoriser l'échange d'information et la coordination de certaines actions transverses.

Enfin, le CS du PNST invite de manière permanente :

- les représentants de l'INSU:
 - Guy Perrin (DSA)
 - François Leblanc (chargé de mission à la division AA de l'INSU)
- les responsables du groupe "Soleil-Héliosphère-Magnétosphères" (SHM) au CNES :
 - Kader Amsif (responsable thématique, CNES)
 - François Leblanc (président du groupe SHM)

Cette invitation sera étendue au CEA, puisque celui-ci contribue financièrement au fonctionnement du programme depuis 2019.

Animation

L'animation du programme est faite à plusieurs niveaux. En premier lieu, le site web du programme (<http://pnst.ias.u-psud.fr/>) met à disposition les informations concernant la vie du programme. Ce mode de communication est complété par une liste de diffusion sur laquelle sont envoyées toutes les informations, notamment celles concernant des appels d'offres, des offres de postes, qui peuvent intéresser les membres du programme. Ensuite, le programme mène une politique active dans son domaine au travers de l'appel d'offre annuel et des liens étroits qu'il entretient avec le groupe SHM du CNES. Enfin, le programme a basé son fonctionnement sur deux colloques où sont présentés les résultats scientifiques et où sont discutées les orientations à apporter aux thématiques et fonctionnement du PNST. Ces deux colloques se distribuent sur un mandat avec un colloque à mi-parcours et un colloque de renouvellement. Jusqu'à présente, du fait d'un mandat de 4 ans, ces colloques avaient lieu tous les deux ans, mais avec le passage à 5 ans, nous avons espacé à 2 ans ½ l'intervalle entre deux colloques. Ainsi, le colloque à mi-parcours s'est tenu à Hendaye au printemps 2016 et le colloque de renouvellement s'est tenu à Sète à l'automne 2018. Une partie substantielle du budget du programme sert à cette animation, jugée indispensable par les membres du programme.

Budget du programme

Origine des crédits

Le PNST est un programme dont le financement est multiple : principalement cofinancé par l'INSU (division Astronomie- Astrophysique) et le CNES, il est, depuis 2019, financé également par le CEA. La contribution de ce dernier est actuellement symbolique, mais elle marque l'attachement de l'organisme aux activités scientifiques soutenues par le programme, notamment en physique solaire. Cet élargissement du financement permet d'améliorer la visibilité du programme, notamment dans une perspective d'un renforcement de l'OFRAME, dont le PNST est l'instigateur. Ainsi que la *Figure 38* le montre, la répartition du financement était 50-50 entre INSU et CNES jusqu'en 2017 et a évolué vers 55-45 depuis.

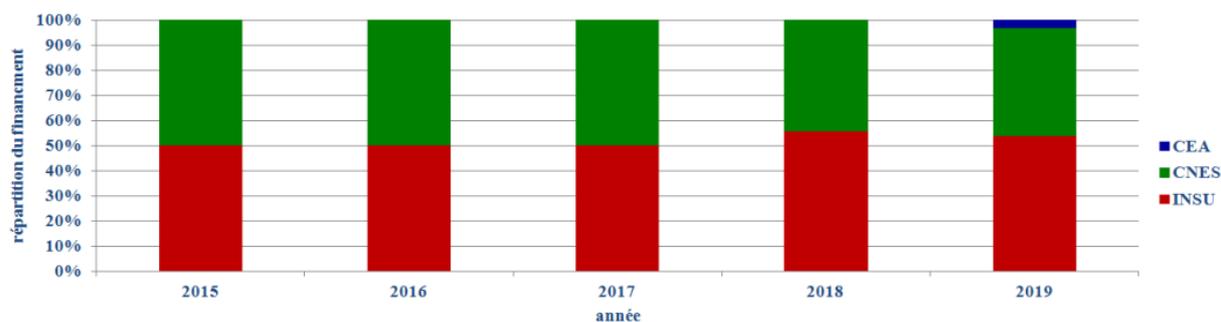


Figure 38. Répartition des financements par organisme financeur sur la période 2015 – 2019.

Financement

Sur la période 2015-2019 (Figure 39), le budget du PNST a subi une érosion constante, passant de 170000 € à 149000 € (courbe en rouge), avec un montant des demandes oscillant entre 250000 et 310000 € (courbe en bleu), ce montant suivant le nombre de demandes annuelles (courbe en vert).

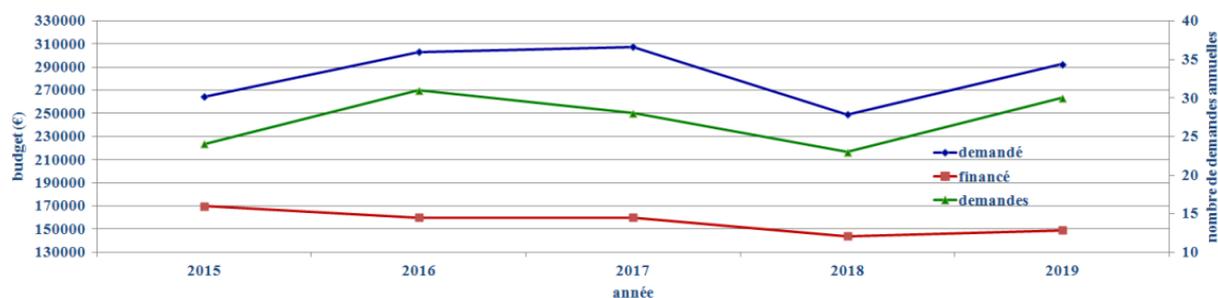


Figure 39. Montant total des demandes financières (bleu) et budget alloué (rouge) sur la période 2015 – 2019. La courbe en vert représente le nombre de demandes annuelles sur cette période.

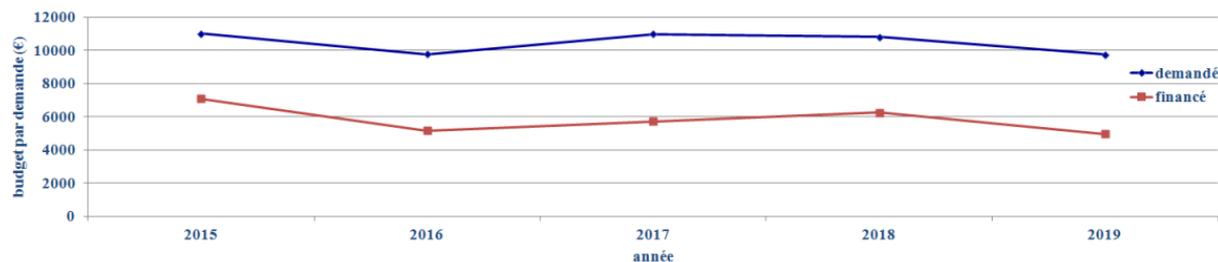


Figure 40. Données financières normalisées au nombre de demandes annuelles : montant unitaire des demandes financières (bleu) et budget unitaire (rouge) sur la période 2015 – 2019.

Si on ramène les données au nombre de demandes, on obtient alors les courbes de la Figure 40. On constate alors que les demandes unitaires varient entre 10000 et 11000 € sur la période, avec un budget unitaire disponible entre 5000 et 7000 €. Par ailleurs, les courbes évoluent de manière parallèle, ce qui signifie que la variation du financement du programme est principalement due aux fluctuations fortes du nombre de demandes qui varient d'environ 30 % sur la période, entre 23 et 31.

Animation scientifique

Ainsi que nous le mentionnons plus haut, l'animation du programme est basée sur un Conseil Scientifique et deux colloques. Pour la période 2015-2019, le coût de cette animation était environ 90000 €, soit 11 % du budget alloué au programme sur la période. 5 % sont dédiés au fonctionnement du Conseil Scientifique (sous forme de missions) et 6 % correspondent au financement des deux colloques, pour lesquels le programme a pris en charge la location des sites et l'hébergement (pour environ 200 personnes sur les deux colloques).

Répartition des demandes

Nous avons établi une statistique des demandes sur la période 2015-2019, regroupant ainsi 136 propositions de financement. La *Figure 41* ci-dessous donne la distribution des montants demandés sur la période. En moyenne, les demandes sont d'environ 10500 €, avec une demande médiane de 9000 €. Ceci indique donc qu'il y a des demandes avec un montant relativement élevé (le maximum est supérieur à 30000 €), mais que la majorité des demandes concerne des montants de l'ordre de 10000 € ou moins. Ainsi, 50 % des demandes sont entre 5900 € et 14900 €, avec un écart type de 6500 €. On constate donc une grande dispersion autour d'un montant demandé, qui est toutefois largement supérieur à un soutien de base.

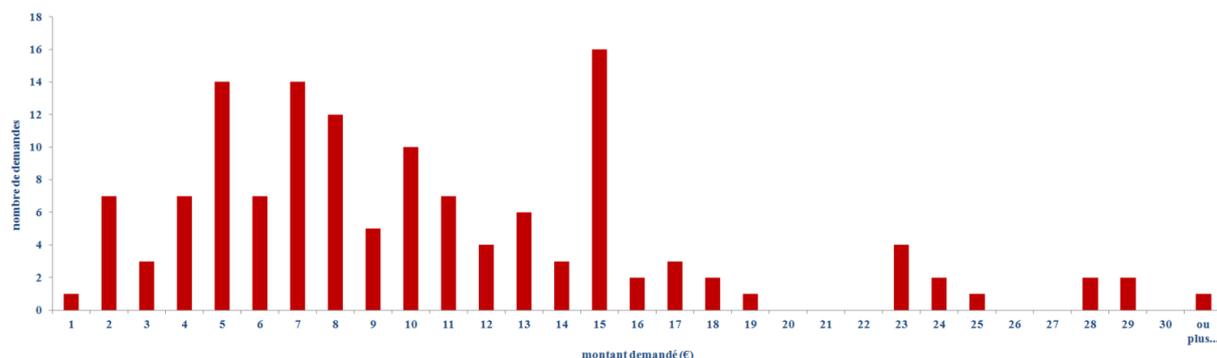


Figure 41. Répartition des montants financiers des demandes sur la période 2015-2019.

Si on regarde le budget alloué (*Figure 42*), on constate que le financement moyen est de 3900 €, avec une médiane à 5000 €. Ceci indique que les demandes avec faible montant ont été relativement mieux financées que les demandes avec des montants élevés. Ainsi 50 % des demandes financées sont entre 3000 et 7000 euros, avec un écart-type de 4000 €. Clairement, avec le budget disponible et une politique scientifique du programme large couvrant tous les aspects des relations Soleil-Terre, la position du PNST a été de financer le maximum de demandes, avec des montants qui s'apparentent à du soutien de base.

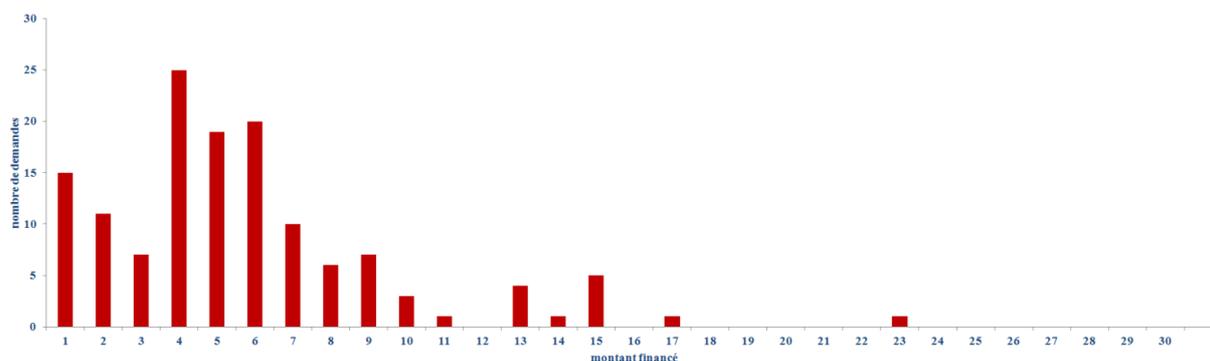


Figure 42. Répartition des montants alloués aux demandes sur la période 2015-2019.

Le programme a reçu une dizaine de demandes de financement de colloques (souvent transversaux à plusieurs programmes), pour lesquelles la politique a été de financer à hauteur d'environ 2000 euros, contribuant à abaisser la valeur moyenne de financement des projets de recherche.

Par ailleurs, si on s'intéresse au taux de financement des demandes sur la période 2015-2019 (Figure 43), on constate que les demandes ont été financées en moyenne à hauteur de 56 % du montant de la demande, valeur égale au taux médian. 50 % des demandes ont été financées à une hauteur entre 43 et 71 %, principalement à cause du financement des demandes à faible montant.

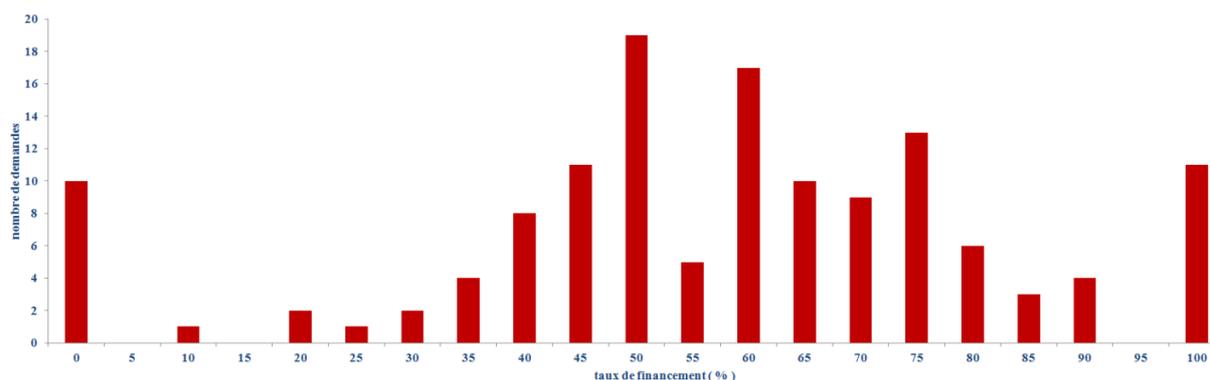


Figure 43. Répartition du taux de financement par rapport à la demande, sur la période 2015-2019.

Enfin, on note que 10 demandes n'ont pas été financées, soit 7 % des demandes.

En conclusion, en excluant du financement le budget consacré à l'animation du programme, le taux de pression sur la période 2015-2018 s'élève à 2, avec un nombre moyen de demandes annuelles de 27. La politique du programme a clairement été de soutenir l'activité scientifique du programme, notamment les équipes qui ne bénéficient pas de soutien extérieur comme celui du CNES pour les missions spatiales. De fait, la forte fluctuation observée s'explique par les équipes ayant des financements extérieurs, qui n'ont pas déposé de demandes au PNST. Pour la visibilité du programme, nous devons donc fournir un effort pour que ces équipes émergent même à un montant symbolique.

Publications

Les outils manquent pour déterminer les publications relevant du programme PNST. Après une recherche sur ADS et filtrage, nous avons pu établir que le nombre de publication de rang A dans le

périmètre du PNST s'établit à 1365 sur la période 2014-2019 et 1161 sur la période 2015-2019 (Figure 44).

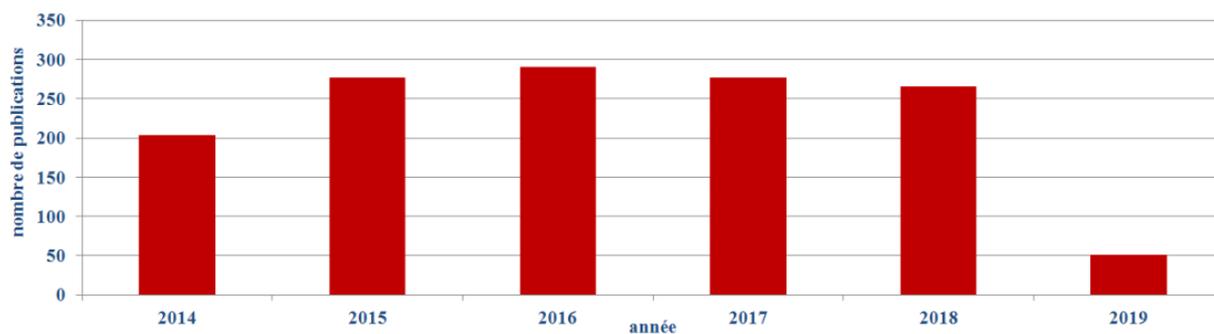


Figure 44. Evolution du nombre de publications sur la période 2014-2019.

Ceci représente environ 227 publications par an, avec un taux médian de 271 publications pour une population active de 188 personnes. Une liste bibliographique détaillée du PNST est fournie dans un document séparé.

Annexes

Annexe 1: Récapitulatif des expertises françaises en instrumentation spatiale

L'instrumentation spatiale développée pour ces missions constitue un pan important de l'activité des laboratoires qui mobilise les équipes scientifiques et techniques sur plusieurs années. On notera à cet égard les expertises complémentaires développées par les laboratoires, à savoir (liste non exhaustive) :

- CEA :

- Sismographe pour hélio-sismologie (cf. GOLF_NG-SOHO)
- Spectro et imageur X (STIX-SOLAR ORBITER avec LESIA)

- CEA/IPGP :

- Magnétomètre absolu et vectoriel (ASM)

- IAS :

- Imageur et coronographe Lyman Alpha UV (LYOT)
- Imageur solaire EUV (EUI)
- Spectrographe UV à transformée de Fourier (R&T CNES)
- Spectro-imageur EUV à fente (LEMUR)
- Projets d'imageurs de Fresnel EUV compacts (adaptés L5 ou hors écliptique)

- IRAP :

- Analyseur électrons thermiques (SWEA-STEREO, MAVEN ; MEA-BEPICOLOMBO)
- 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)

- 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 :

- Expérience radio et ondes plasma (RPW-SOLAR ORBITER)
- Récepteur radio (SORBET-BEPI COLOMBO)

- LPC2E :

- Sonde à impédance mutuelle (AM2P-BEPI COLOMBO, ROSETTA)
- Boucle haute fréquence
- Boucle de Rogowskii
- Search-coil et pré-amplificateur (SOLAR ORBITER, SOLAR PROBE PLUS, 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)

- LPP :

- Fluxmètres (STAFF-CLUSTER, THEMIS, MMS ; DBSC-BEPI COLOMBO)
- Analyseurs ions thermiques magnétiques (HYPERBOLOID-INTERBALL ; DYMIO-MARS96)
- Analyseurs ions temps de vol (réflectron) (CAPS-CASSINI ; MSA-BEPICOLOMBO)
- Analyseur plasma (IAP-DEMETER)
- Détecteur pour analyseur de particules (DFMS-ROSETTA)
- Récepteur basse fréquence (SOLAR ORBITER)
- Sonde de Langmuir (ISL-DEMETER)
- Analyseur 3D électrons ou ions thermiques 3D (R&T CNES)

- ONERA/CNES :

- Détecteur d'ions et électrons énergétiques (ICARE_NG)

- ONERA/ISAE :

- Accéléromètres classiques et compacts (Oscillateur à Quartz)

On se référera au document de prospective du groupe SHM pour des informations techniques sur ces instruments.

Annexe 2: Codes numériques

Les codes identifiés avec une astérisque (*) sont des codes développés principalement par la communauté française

Modélisation et simulations numériques

Modèles neutres : Pour les milieux neutres peu ou non collisionnels comme par exemple les exosphères planétaires ou dans le milieu interplanétaire, les approches cinétiques résolvant l'équation de Liouville (ou Boltzmann si les collisions sont prises en compte) sont utilisées.

- modèles Hdens et Hedens : modèles décrivant la trajectoire des neutres provenant du milieu interstellaire dans le milieu interplanétaire.

-- modèle exosphérique EGM : modèles Monte Carlo 3D, parallèle, résolvant l'équation de Liouville (ou Boltzmann) pour simuler les exosphères neutres de différents objets planétaires (application à Mars, Mercure, Ganymède, Europe, Lune).

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.

- modèles ionosphériques TRANSCAR : modèle décrivant la dynamique des ondes de Langmuir : pour mieux quantifier le rôle des fluctuations de densité dans l'interaction plasma - faisceau dans un plasma inhomogène du vent solaire nous avons récemment amélioré un modèle décrivant le processus de relaxation du faisceau et la génération des ondes électrostatiques et électromagnétiques.

- Modèle IPIM (IRAP Plasmasphere-Ionosphere model) : IPIM est la nouvelle génération de modèle physique d'ionosphère issu de la famille TRANSCAR. La principale évolution consiste en l'introduction d'une géométrie permettant de résoudre les équations de transport le long d'une ligne de champ fermée et donc de décrire la dynamique couplée plasmasphère-ionosphère. Une résolution à 16-moment a été intégrée pour pouvoir tenir compte du développement de fortes anisotropies à haute altitude.

- modèle de formation et de propagation de filaments de plasma (appelés *streamers*) dans l'ionosphère et la mésosphère terrestre provoquées par la production d'un champ électrique quasi-statique suite à une décharge d'éclair sous-jacente. Ce modèle permet d'étudier la formation, la dynamique, la microphysique et la morphologie des sprites, et permettra d'exploiter les mesures photométriques de TARANIS.

- Modèle ionosphérique martien GCM-IONO : : Modèle de circulation général Martien incluant la dynamique du plasma ionosphérique.

Codes PIC (*Particle-in-Cell*) : Ces codes résolvent l'équation de Vlasov de manière lagrangienne pour les ions et les électrons. Les champs électromagnétiques sont résolus sur une grille et prennent comme source les densités de charge et de courant issues des macroparticules et interpolées sur la grille.

- SMILEI(*) : code 3D, Open-Source, C++, massivement parallèle à équilibre dynamique de charge, permet la simulation d'une grande variété de plasmas, allant des plasmas relativistes interagissant

avec des LASER aux plasmas spatiaux et astrophysiques.

- TRISTAN (code 3D PIC explicite, différences finies) : application à l'étude de l'interaction globale 3D vent solaire-magnetosphere terrestre. Etude des frontières internes (cornet polaire, queue géomagnétique proche et front de dépolarisation).

- IPIC3D (code 3D PIC explicite): application à l'étude de l'interaction globale 3D vent solaire-anomalies magnétiques lunaires (LMA) et formation de "swirls" .

- ECSIM (code 3D PIC implicite avec conservation de moments; actuellement prototype): application à l'étude de l'interaction globale 3D vent solaire- Magnetosphere de Mercure ; Application à la mission *BepiColombo*

- UPIC-UZEIN et UPIC-UCLA (codes 1D/2D PIC, périodique /aperiodique, pseudo spectral)

* etude des chocs noncollisionnels terrestre et planétaire

* collisions frontales de chocs non collisionnels

* etude de la turbulence dans le front des chocs noncollisionnels (applications à MMS)

CAMELIA 1D/2D/3D (code hybride, périodique /apériodique) : version 2D utilisée pour étudier la dynamique et nonstationarité de choc quasi-parallèle; formation de Jets de très haute vitesse (HSJ) dans la magnétogaine (application aux missions CLUSTER et MMS) .

EPOCH (code 1D/2D/3D PIC a différences finies): étude du choc terminal héliosphérique et bilan d'énergie des pick-up ions.

- PICCANTE : code PIC relativiste, open source, parallélisation MPI. Originellement développé pour la communauté laser-plasma, il est aussi utilisé pour des applications spatiales, telle que l'étude des émissions radio dans le vent solaire.

- iPIC3D : code PIC (semi-implicite), parallélisation MPI. Il est utilisé pour des applications nécessitant une description cinétique des électrons, sans avoir le besoin de résoudre les échelles électrostatiques électroniques (longueur de Debye et fréquence plasma). Utilisé pour un projet PRACE de physique des plasmas cométaires.

- SPIS (Spacecraft-*Plasma* Interaction System) destiné à l'étude des interactions entre un plasma et un satellite, existe sous forme Full PIC et Hybride. Il permet de préparer le design de futures missions spatiales, et d'étudier les effets instruments associés aux effets de charges des satellites et des sondes spatiales.

- modèle Monte Carlo de la dynamique d'électrons se propageant dans l'atmosphère terrestre et soumis à un champ électromagnétique. Le code développé permet de simuler l'accélération

d'électrons sur un grand domaine d'énergie (de la fraction d'eV jusqu'au GeV) de manière consistante et continue dans des milieux collisionnels où des champs intenses sont présents, tels qu'à proximité de la tête d'un leader d'éclair. Ce modèle permet d'étudier la production de Terrestrial Gamma-ray Flashes grâce au calcul associé du transport des photons de haute énergie dans l'atmosphère terrestre.

Codes Vlasov : Ces codes permettent de décrire un plasma non-collisionnel. Ils permettent d'aborder des problèmes de nature cinétique comme l'accélération du vent solaire en présence de distributions non Maxwelliennes, la saturation de l'instabilité et la formation des structures « miroirs » dans la magnétosphère, le développement et la saturation d'instabilités électrostatiques dans le vent solaire.

- VLASOV-POISSON-1D1V et VLASOV-POISSON-2D2V sont deux versions d'un même code Vlasov, dans la limite électrostatique (évaluant les fonctions de distributions électronique et ionique dans l'espace des phases, l'un 2D et l'autre 4D), utilisés entre autre pour étudier la relaxation des faisceaux d'électrons suprathermiques se propageant dans le vent solaire et en amont des chocs non-collisionnels.

Codes hydrodynamiques 1D : Ces codes sont utilisés notamment pour calculer l'évolution thermo-hydrodynamique d'une boucle coronale ou d'une ligne de champ magnétique dans le vent solaire suite à du chauffage.

- HYDRAD : modèle hydrodynamique incluant le calcul des populations d'ions (potentiellement hors équilibre) et leur rayonnement.

- VP* : code hydrodynamique 1D pour le vent solaire. Runs disponibles à MEDOC.

Codes MHD : utilisés notamment pour comprendre la dynamo, la convection, 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.

- METEOSOL* : code MHD avec méthodes implicites

- MESHMHD* : code MHD 3D en maillages non structurés, des solveurs de Riemann pour la capture de chocs

- ARMS : code MHD 3D (géométrie cartésien, sphérique) en méthode de « flux corrected transfer » Permet d'assurer la positivité des grandeurs même en présence de choc ainsi que la conservation de la divergence du champ magnétique à la précision machine. Utilise une grille décalée et un maillage adaptatif dynamique, parallélisations MPI. Code très peu dissipatif. Utilisé pour la modélisation des éruptions et des éjections solaires.

- OHM-MPI* : code MHD 3D (géométrie cartésien) visco-résistif, parallélisations MPI. Module permettant de faire des calculs en zero-beta. Utilisé pour l'étude des phénomènes actifs solaires. Peut être utilisé pour faire des simulations initiées et dirigés par les données (extrapolation du champ magnétique en entrée). Runs disponible à Medoc.

- ASH* : code 3-D MHD (géométrie sphérique) dans l'approximation anélastique, parallélisation MPI. Calcul hydrodynamique ou avec rétroaction magnétique et équation d'induction. Utilisé pour comprendre la dynamo, l'activité et la convection/rotation solaire et par extension stellaire.

- PLUTO : code 3-D MHD compressible multi physique et géométries, parallélisation MPI. Calcul hydrodynamique, MHD de toutes sortes de configurations solaires soient locales ou globales. Utilisé pour les simulations de vent solaire et d'interactions magnétiques étoiles-planètes développés et améliorés en France.

- TURBO : code spectral, parallèle, adaptatif en temps et incluant l'effet Hall

- MPI-AMRVAC : code MHD 3D (géométrie Cartesian, cylindrical, spherical) » à maillage adaptatif, parallélisations MPI

- FLR-LF 3D: code spectral 3D (géométrie cartésienne) pour la Hall-MHD étendue incluant pressions anisotropes, flux de chaleur et fermetures cinétiques sur les moments du quatrième ordre (pour les ions et les électrons), et effets de rayon de Larmor ionique fini. Code modulaire permettant d'inclure ou non les effets physiques allant au-delà de la MHD. Parallélisation MPI en deux directions d'espace, avec I/O fortement optimisés. Utilisés notamment pour la turbulence dans les plasmas non-collisionnels du vent solaire à des échelles s'étendant de la zone MHD à la zone sous-ionique

- ShellAtm (*) : code pour la turbulence dans les boucles coronales et le vent, basé sur un empilement 1D de modèles « en couches » de turbulence MHD 2D, parallélisation MPI.

- EBM (*) : MHD 3D compressible modifiée par l'expansion. Code pseudo-lagrangien d'évolution turbulente dans un vent donné.

Codes hybrides : Ce type de codes permet en théorie d'étudier les phénomènes des plasmas non collisionnels à des échelles allant d'une fraction du rayon de Larmor et de la fréquence cyclotronique ionique aux échelles MHD. Ils sont couramment utilisés pour la modélisation de processus plasmas d'intérêt pour la physique spatiale et l'astrophysique, tels que la reconnexion magnétique, l'instabilité de Kelvin-Helmholtz, la turbulence et diffusion associée de particules, les instabilités cinétiques. Ils sont également utilisés pour modéliser de petites magnétosphères telles que celles de Mercure, Ganymède ou Mars.

- Heckle: Ce code a été développé depuis la première moitié des années 2000 au LPP. Ecrit en C il est 3D et massivement parallèle. Il permet la simulation de N espèces d'ions et utilise une loi d'Ohm généralisée incluant différentes fermetures électroniques. Le code permet également d'inclure des collisions ions-ions. (R. Smets, N. Aunai, L. Nicolas, A. Sladkov)

PHARE (*): code hybride 3D à maillage adaptatif permettant de simuler de très grandes échelles, habituellement accessibles uniquement en MHD, tout en pouvant résoudre les échelles sub-ioniques là où nécessaire.

LaThys (*): Modèle hybride 3D, parallèle, décrivant l'interaction d'un plasma avec enveloppes gazeuses planétaires (application à Mars, Titan, Mercure, Ganymède, Terre)

AIKEF (Adaptive Ion-Kinetic Electron-Fluid) : Ce code, versatile, parallélisé, et hautement efficace, permet de réaliser des simulations 3D de vortex créé par l'instabilité de Kelvin-Helmholtz.

Codes d'analyses de données

Codes de modélisation de données observées :

- Multi-VP (*) : Code de modélisation de la structure 3D du vent solaire, constitué par un ensemble contigu de solutions uni-dimensionnelle à partir de mesure du champ magnétique solaire..

- PIC-2D ondes de choc (*) :

- XTRAPOL-FEMQ * & - BLFFF- FROMAGE * : Codes magnétostatiques d'extrapolation des champs magnétiques coronaux : ces codes de modélisation résolvent des problèmes aux limites. Ils sont utilisés afin de modéliser la distribution 3D du champ magnétique de l'atmosphère solaire à partir de données observées sur la surface 2D solaire. Les sorties de ces modèles peuvent ensuite être utilisés comme conditions initiales dans des simulations numériques.

- SolarCast * : pipeline basé sur l'assimilation de données solaires 4D-var basé sur 2 modèles physiques : un modèle dynamo champ moyen pour la prévision du cycle de 11 ans (Solar Predict) prenant les données de diagramme papillon et de nombre de taches solaire (SIDC) et un modèle de tas de sable/avalanche (Flare Predict) sur la prévision des éruptions extrêmes utilisant les données Goes et Rhessi.

Codes d'analyse de topologie magnétique :

- TOPOTR (*): code d'analyse des propriétés topologiques (point null, séparatrices, quasi-séparatrices) d'un champ magnétique 3D. Ce code permet d'identifier les sites préférentiels de reconnexion magnétique dans l'atmosphère solaire et de les comparer avec des données d'observations (e.g. images EUV)

- QLSQUASHER : code d'analyse topologique, avec parallélisations sur CPU mais aussi sur GPU. La communauté française développe des modules de calcul de l'hélicité magnétique à partir de ce code.

Codes de visualisation 3D :

PARAVIEW : code de visualisation. Il est utilisé en turbulence MHD pour identifier, par exemple, les structures dissipatives, en physique solaire pour représenter le champ magnétique coronal, en planétologie plasma pour visualiser les interactions vent solaire-objets du système solaire.

HelioViewer : visualisation de données d'observations, multi-instruments, en 3D, développé par la NASA (client web) et l'ESA (client Java), avec un serveur installé à MEDOC.

3DView (CDPP) : ...

Bibliothèque d'analyse des données de simulation MHD (CCMC's Bats'R'us, OpenGGCM) : Cette librairie est dédiée à la lecture et l'analyse des données récupéré par le « run on request » du CCMC pour les simulations Bats'R'us et OpenGGCM. Un simple module d'interpolation des données « kameleon » est fourni avec ces données. La bibliothèque permet l'analyse et la représentation sous divers format des données (3D, 2D), et possède des méthodes de détection de frontière. Tous ces modules sont automatisés, il suffit de rentrer un fichier de données en input pour obtenir une représentation 2D ou 3D de la quantité désirée, et réaliser des analyses.

Bibliothèques d'analyse de données : la communauté PNST est fortement impliqué dans le développement de bibliothèques et de routines permettant d'analyser différents jeux de données, numériques et observationnels. Ces développements s'inscrivent dans le cadre de vastes bibliothèques

destinées à l'ensemble de la communauté internationale.

SolarSoft : analyse de données de physique solaire, en IDL.

Astropy, SunPy : analyse de données astrophysiques et de données solaires, en Python

Bibliothèque d'analyse des données plasma : Ces bibliothèques combinent une bibliothèque de lecture de données de fichier CDF, de fonctions d'analyses simples (tracé, calcul de moyenne, traitement des données manquantes), et de méthodes d'analyse poussée dédié aux plasmas interplanétaires.

Codes de transfert radiatif :

La communauté PNST développe par ailleurs des codes de transfert radiatif. D'une part, dans le domaine UV, les codes d'inversion de la mesure d'émission différentielle (DEM) permettent d'obtenir les propriétés thermodynamiques du plasma. Ces codes permettent d'exploiter les données d'imageur et spectrographe UV, e.g. AIA/SDO, EIS/Hinode. D'autre part, les codes de transfert radiatif appliqués aux données spectro-polarimétriques dans le domaine optique, permettent de déterminer les conditions d'émissions et de déterminer les propriétés magnétiques dans la basse atmosphère solaire. Ces codes sont utilisés notamment pour l'exploitation des données du télescope THEMIS et pour la préparation des projet européen EST et américain DKIST.

- OPTIM3D: Transfert de rayonnement pour des raies spectrales formées à l'équilibre thermodynamique local, dans des atmosphères à 3D (par exemple en présence de magnéto-convection). Appliqué à la modélisation des profils des raies observées par le satellite Hinode à haute résolution spatiale.

- emission UV & X

CHIANTI : code de physique atomique et de calcul des spectres en UV (sans transfert de rayonnement), utile pour la couronne solaire.

Code de transfert de rayonnement de raies de résonance : Code Monte Carlo 1D ou 3D décrivant la diffusion résonante des photons solaires dans un environnement planétaire optiquement épais (raie Lyman- α de l'hydrogène sur Vénus et Mars, raie de l'oxygène 130.4 nm sur Mars, raie du sodium à 589 nm sur Mercure)

Xnorm_spec : Calcul d'émission X par échange de charge dans l'héliosphère.

- inversion des raies photosphériques :

UNNOFIT : Code d'inversion de données spectropolarimétriques, appliquant l'algorithme de Levenberg-Marquardt à la solution analytique de Unno-Rachkovsky de l'équation de transfert polarisé à travers une atmosphère de Milne-Eddington. Ce code est utilisé pour l'inversion des données THEMIS, HINODE/SOT/SP et SDO/HMI

- inversion dans les protubérances et filaments - inversion des raies chromosphériques.

PROM7...(*) : codes de transfert radiatif dans les filaments et les protubérances, hors équilibre thermodynamique local, et maintenus par MEDOC

"Second Spectre Solaire"

- XTAT (*): Ce code effectue la résolution simultanée et couplée des équations de transfert du rayonnement polarisé et des équations de l'équilibre statistique de la matrice densité atomique, à plusieurs niveaux et avec profils de raie), dans le but de décrire la redistribution partielle du rayonnement dans la diffusion. Cela s'applique à la modélisation du "second spectre solaire", le spectre de la polarisation linéaire formée par diffusion et observée près du bord solaire.
- MULTI: transfert de rayonnement dans des raies formées hors-ETL dans des atmosphères 1D. Ce code est utilisé pour initialiser des calculs de la polarisation de résonance dans des raies du second spectre solaire (spectre de polarisation linéaire) observées par Themis essentiellement.
- CLV-POL (*): calcule la polarisation linéaire des raies du second spectre en l'absence ou en présence d'effet Hanle dû à des champs magnétiques faibles. Le code prend en compte la redistribution partielle en fréquence du rayonnement due à la diffusion dans les raies spectrales, dans l'approximation de l'atome à deux niveaux. S'applique à l'interprétation des observations de la polarisation du second spectre solaire avec Themis pour la détermination des champs magnétiques faibles dans les régions calmes du Soleil.

Annexe 3: Recommandations des groupes de travail organisés au colloque de renouvellement du PNST

Lors de son colloque de renouvellement, à Sète en novembre 2018, le PNST a organisé sept groupes de travail pour formuler des recommandations sur ses activités à venir. La liste ci-dessous énumère ces recommandations.

Météorologie de l'espace (GT 1):

- Il faut faire avancer la concertation avec les utilisateurs hors recherche
- La France doit s'impliquer plus fortement dans le programme Space Situational Awareness de l'ESA, y compris au niveau de l'instrumentation produite par les laboratoires de recherche.
- Une réflexion doit être menée sur l'emploi des techniques d'assimilation de données et d'intelligence artificielle dans le développement d'outils pour la météorologie de l'espace.
- L'offre de formation par la communauté scientifique doit être augmentée, y compris/notamment à l'attention des écoles d'ingénieurs.

Services d'observation (GT 2):

- Regrouper les services relevant d'une même mission spatiale.
- Poursuivre les réflexions sur la création d'un PTN physique des plasmas héliosphériques.
- Donner une visibilité météorologie de l'espace aux ANO 6 et 5.
- Considérer la labellisation ANO 6 d'outils de modélisation et de leur évolution vers des modèles opérationnels.
- Revoir les contours des services ANO 6 actuels pour former des services plus gros, y compris pour permettre le développement de nouvelles activités à l'intérieur de services labellisés.

Evolution des bases de données (GT 3):

- Fédérer certaines bases de données / services pour donner une meilleure visibilité.
- Intégrer les données Meteospace dans BASS2000 (=BASS2000 Meudon).
- Veiller à l'évolution harmonieuse de MEDOC (espace) et BASS2000 (sol), dont la fusion simple n'est pas une option réaliste, étant donnée la réticence du CNES quant au financement d'activités liées aux observations sol.
- Etudier l'utilité des méthodes d'IA pour l'exploitation des bases de données (reconnaissance automatisée de structures ...)
- Développer des requêtes sur des sites distribués de données.
- Développer la description standardisée des codes numériques de simulation.
- Mutualiser les outils de visualisation des résultats de simulations.
- Avancer vers le développement d'une base de données de codes numériques.
- Faire rentrer les modèles dans les services ANO 6 (voir GT 2).

Perspectives en instrumentation (GT 5):

- a) Instrumentation sol :
 - Exploiter les nouvelles possibilités d'observation avec THEMIS qu'offre l'optique adaptative.
 - Mettre en place un comité de programme pour les observations de THEMIS.
 - Fournir des documents pédagogiques pour les nouveaux utilisateurs de THEMIS.
 - Poursuivre la réflexion sur une participation réaliste de la communauté française dans le projet EST.

- Veiller à la poursuite de l'investissement français dans les radars SuperDARN, étant donné la position unique du site des Iles Kerguelen.
 - Considérer l'utilisation d'instruments généralistes (par ex. SKA) dont l'utilisation ne remplace néanmoins pas le fonctionnement d'instruments dédiés.
 - Préserver la possibilité de développer de "petits" instruments qui sont des éléments essentiels de la surveillance solaire et pour la météorologie de l'espace (Meteospace, coronographes solaires, spectrographes auroraux rapides)
- b) Instrumentation espace :
- Promouvoir l'importance d'une mission L4/L5 pour les recherches avec coloration météorologie de l'espace
 - Participer, avec des groupes étrangers, à l'instrumentation d'une mission L4/L5
 - Avancer dans la définition scientifique de nanosats, au-delà des aspects de formation.
 - Se limiter à des charges utiles pour les laboratoires (le développement de plateformes est chronophage)
 - Manifester la nécessité d'une nouvelle mission magnétosphérique. S'entendre sur le soutien d'une mission plutôt que plusieurs.
 - Pour la R&T en instrumentation, profiter du vide programmatique actuel dans nos domaines pour développer de nouvelles idées autour des mesures multipoints et hyperspectrales; ne pas néglige les programmes H2020 Space et autres.

Calcul numérique, "big data", Intelligence artificielle (GT 6) :

- Renforcer les contacts avec les masters et écoles d'ingénieurs qui pourraient avoir un intérêt pour ces aspects HPC/Big data (aspect Machine Learning très à la mode)
- Réfléchir à une nouvelle section CNRS mixte (ex : astroparticules) -> modélisation numérique en Sciences de l'Univers
- Se rapprocher du réseau des numériciens et calcul du CNRS (ITA à proposer dans le réseau) <http://calcul.math.cnrs.fr/spip.php?article89>
- Mutualiser des IT au-dessus des labos (niveau mésocentre de calcul, OSU...) -> recommandation d'AstroSIM
- Améliorer accès au matériel tier 3 pour améliorer la distribution des données et l'accès (demandes CSAA, mutualisation entre labos, projets EU, ANR, CNES ...)
- Développer le savoir-faire de la communauté en IA (techniques de différenciation automatique pour des codes adjoints, TAPENADE; logiciel CERFACS: OPEN PALM, OASIS)
- Pour satisfaire au besoin d'échange et de formation professionnalisante de haut niveau, chercher des contacts avec des experts en dehors de la communauté PNST (renforcement du partenariat Météo France/CERFACS sur l'assimilation de données, répondre à l'AO de l'Institut Pascal, IPA Saclay)
- S'inspirer du CCMC pour les aspects "scoreboard" de validation de modèles pour la prévision
- Pour aller vers le couplage des modèles du Soleil à la Terre, insérer les nombreux outils dont dispose la France dans les activités européennes – en tenant compte de la situation concurrentielle que crée au niveau européen l'établissement des services opérationnels tel celui pour l'OACI.

Enseignement, communication grand public, science participative (GT 7) :

- Développer une école thématique récurrente du PNST
 - annuelle ou bisannuelle, à organiser au printemps pour attirer les M2 en stage
 - ne pas l'adosser au colloque PNST, parce que 2,5 jours est une durée trop courte

- viser un public international : doc/post doc /chercheur
- analyse de données & outil Couplage/Lien Processus & objet & instrumentation & simulation
- Alternance école généraliste / spécialisée
- Importance des TP (moitié des cours ?)
- Co-organisation avec d'autres PN pour certaines thématiques
- Si école spécialisée, possibilité d'ajouter 1 jour avant de « mise à niveau »
- Mutualiser les matériels d'enseignement de la communauté
 - fichier excel à remplir par la communauté, via un sous-responsable par lieu (master).
 - Respect de la propriété intellectuelle (citation, ne pas « délocaliser » l'expertise)
 - Partage du matériel via le fichier excel
- Diffusion des connaissances :
 - Le CS recense / vérifie / incite la présence de la communauté aux manifestation majeures (en veillant à la parité de genre):
 - Rencontres Ciel & Espace
 - Lien UdPCC, CLEA
 - Participations aux revues: Clairaut, Astronomie
- Science participative :
 - Explorer des pistes:
 - Amélioration du suivi temporelle et de la répartition spatiale (ex. détecteur gamma des doses de radiation en vol, IRSN)
 - Imagerie solaire: grande qualité, H-alpha, eclipse. Future: magnétographie ?
 - S'inspirer d'initiatives dans d'autres domaines:
 - RadioJove
 - Radio amateur: contribution lors des survols de planètes, sondage de l'ionosphère, segment sol de PICSAT
 - contribution à l'analyse de données <https://www.zooniverse.org>;
 - projet francophone de recherche de météorites (gros succès dans certains clubs): <https://www.vigie-ciel.org/>
 - Mission nationale sur les sciences participatives : rapports peut-être utiles: <http://www.sciences-participatives.com/Rapport>