SPS 2019

CNES

GROUPE DE TRAVAIL SOLEIL HELIOSPHERE - MAGNETOSPHERES (SHM)

Membres du groupe SHM : F. Auchère, E. Astafyeva, F. Baudin, S. Bourdarie, C. Briand, S. Brun, S. Célestin, V. Génot, M. Kretzschmar, F. Leblanc (président), A. Rouillard, F. Sahraoui

Thématicien : K. Amsif

Table des matières

1. LES GRANDS ENJEUX DE LA DISCIPLINE 3

2. BILAN DEPUIS LE DERNIER COLLOQUE 4

2.1 Bilan programmatique depuis SPS 2014 4

2.2 Physique du Soleil et de l'Héliosphère 5

2.3 Environnements Terrestre et Planétaires 7

a) Magnétosphère terrestre 8

b) Magnétosphères planétaires 10

2.4 Météorologie de l'Espace 11

a) Au service des utilisateurs 12

b) Des modèles scientifiques reconnus 12

c) Une nouvelle structure française OFRAME 13

3. PROSPECTIVE 14

3.1 Objectifs Scientifiques 14

a) Physique du Soleil et de l'Héliosphère 14

b) Environnements terrestre et planétaires 16

c) Météorologie de l'Espace (ME) 19

3.2 Les nano-satellites 22

Références 23

1. LES GRANDS ENJEUX DE LA DISCIPLINE

Les grandes questions scientifiques abordées dans le cadre de la thématique Soleil Héliosphère et Magnétosphères (SHM) couvrent l'ensemble des problématiques liées aux relations entre notre étoile et le système solaire. Cela commence par l'étude de la structure interne du Soleil à travers l'observation multi-spectrales, l'hélio-sismologie et la modélisation ; par l'étude de l'origine de la couronne solaire, son chauffage et l'accélération du vent solaire et des particules énergétiques solaires lors d'événements énergétiques solaires ; et enfin par l'étude de la propagation du vent solaire et des mécanismes de chauffage de celui-ci par dissipation turbulente.

Ces thèmes de recherche amènent une partie de la communauté scientifique à étudier l'interaction du vent solaire et des événements énergétiques solaires avec les magnétosphères intrinsèques ou induites des objets du système solaire, et en tout premier lieu avec la magnétosphère terrestre. Tous les aspects de cette interaction sont abordés, par exemple, la formation des différentes régions de la magnétosphère, les mécanismes les déstabilisant comme les phénomènes de reconnexion à la magnétopause ou de déclenchement d'orages magnétiques depuis la queue magnétosphérique, d'accélération des particules dans les zones aurorales jusqu'au couplage avec l'ionosphère, voire avec la basse atmosphère.

L'ensemble de ces travaux amènent logiquement notre communauté à s'impliquer de plus en plus sur les questions de météorologie de l'espace, en tant que physicien mais aussi avec une volonté de promouvoir de nouveaux outils et des moyens d'observations susceptibles d'améliorer nos diagnostics.

En étudiant l'ensemble Soleil - objets planétaires, notre discipline est logiquement amenée à aborder des questions de physique fondamentale et à traiter de nombreuses questions communes aux autres thématiques des sciences de l'univers. Par exemple, des travaux d'observation et d'analyse des mécanismes de dissipation de l'énergie par des phénomènes turbulents dans le vent solaire (ou dans notre magnétosphère ou d'accélération des particules dans les zones aurorales magnétosphériques et dans l'atmosphère solaire) peuvent amener à faire progresser notablement notre compréhension de ces phénomènes de physique fondamentale.

En exobiologie et planétologie, une partie de la communauté SHM cherche à comprendre ce qui rend viable une atmosphère planétaire. En astrophysique, en extrapolant notre compréhension actuelle de l'interaction entre notre planète et notre étoile, aux autres objets du système solaire, nous contribuons à décrire le rôle d'une étoile sur l'évolution d'un objet planétaire, et nous caractérisons l'environnement de ces objets. Nous travaillons sur la météorologie de l'espace appliquée à tous les objets planétaires de notre système solaire voire au-delà. En effet, il n'existe pas, à l'heure actuelle, d'équivalent à nos capacités d'observer à distance et in situ une étoile comme notre Soleil et son interaction avec le système environnant. De par le développement de nouvelles techniques d'observation, l'identification de nouveaux observables et le développement de nouvelles méthodes d'analyse combinant un grand ensemble de données et de mesures d'origine très variée, notre communauté est amenée à résoudre des problématiques souvent nouvelles en sciences de l'Univers.

Notre discipline est donc naturellement en interface avec la plupart des thématiques des sciences de l'Univers mais a, aussi, de nombreux objets d'intérêt transverses avec les disciplines en sciences de la Terre, environnement et climat. Une partie de notre communauté s'intéresse à l'ionosphère, non seulement comme lieu ultime des perturbations provenant de la magnétosphère et de son interaction avec notre étoile mais également comme région en relations étroites avec l'ensemble des couches atmosphériques. Plusieurs projets scientifiques de notre communauté dans les années à venir ont pour objet d'étudier les effets du forçage solaire sur notre atmosphère mais également d'étudier tous les phénomènes se propageant de la basse atmosphère jusque dans l'ionosphère, par exemple les effets

des nuages orageux sur l'environnement spatial proche, ou les ondes de gravité induites par des tremblements de terre à la surface de notre planète.

Enfin, notre discipline a pris depuis quelques années conscience de l'importance croissant de ses travaux pour notre société, notamment en s'impliquant de plus en plus en météorologie de l'espace. Par sa connaissance de notre Soleil et ses capacités d'observer, d'analyser et de modéliser les perturbations énergétiques solaires se propageant dans le système solaire, notre communauté contribue à aider notre société à accéder à l'espace, à développer des instruments pour son exploration et à en anticiper les risques potentiels.

2. BILAN DEPUIS LE DERNIER COLLOQUE

2.1 Bilan programmatique depuis SPS 2014

Pour rappel, voici le résumé des priorités émises par le GT SHM en 2014 :

P0 Soutien au programme obligatoire de l'ESA *Cosmic Vision* et engagement sur JUICE
P0 Participation à la mission M4 de l'ESA avec deux projets ex aequo sur la microphysique : ALFVEN et TWINS (axe thématique 2 « régimes nouveaux »)
P1 Participation à la mission d'opportunité russe INTERHELIOPROBE (axe thématique 1 « régions nouvelles »)
P1 Participation à mission S2 INSTANT (axe thématique 3 «relations Soleil---Terre»)

Qui peut se synthétiser également sous la forme du tableau suivant prenant en compte les missions identifiées par le GT SHM en 2014 :

Axe scientifique prioritaire	*P0* Une mission M4 ESA	*P1* Missions d'opportunité	*P1* Une mission S2 ESA/CAS	Missions à long terme
Régions nouvelles		***INTERHELIOPROBE***	SPORT	PHOIBOS, SOLARIS, URANUS
Régimes nouveaux	***ALFVEN Ou TWINS***	OHMIC, EDDIE	TOR	vol en formation
Relations Soleil-Terre		EASCO, NITRO	***INSTANT***, SWUSV	OISVA
R&T	miniaturisation et phase 0 pour spectro-imageur			

Le constat est simple à faire en ce qui concerne les priorités programmatiques portées par la communauté SHM en 2014 puisqu'aucune des 4 missions identifiées à l'époque n'a été engagée :

- La mission Interhelioprobe russe qui semblait possible à l'époque a très rapidement été repoussée par l'agence spatiale russe,
- Le CNES a décidé en 2015, pour des raisons budgétaires, de ne pas s'engager sur la mission S2,
- Enfin, la mission TWINS, rebaptisée avec le nom THOR, a été proposée en réponse à l'AO M4, a été sélectionnée en phase A compétitive mais a échoué à passer la dernière étape.
- Tandis que la mission Alfven n'a pas réussi à être sélectionnée en phase A compétitive pour l'AO M5.

A notre connaissance, la seule perspective programmatique dans le cadre du programme obligatoire actuelle permettant de réaliser l'une de ces missions est le projet de mission Debye qui a été présélectionnée pour une phase 2 du Call F. Cette mission, si elle est sélectionnée, pourrait recouvrir une bonne partie des objectifs scientifiques de la mission TWINS (ou THOR pour sa partie vent solaire).

Fort de ce constat, il nous semble nécessaire de repenser la stratégie qui avait été définie en 2014. Par ailleurs, les perspectives dans le cadre du programme Cosmic Vision de l'ESA étant très limitées au cours du prochain quinquennat, les seules perspectives nouvelles pour notre communauté seront à travers la participation à des missions d'opportunité.

2.2 Physique du Soleil et de l'Héliosphère

L'étude du Soleil et de sa variabilité continue de progresser grâce en particulier à l'analyse des données provenant des missions SOHO, STEREO, SDO, PICARD, RHESSI et IRIS souvent associées à des modélisations et des observations sol (télescope solaire THEMIS et Nançay Radiohéliographe). Nous n'évoquerons ici que quelques résultats.

Grâce à la durée exceptionnelle de la mission SOHO, la détection des modes g (pour gravitation) est plus proche que jamais comme l'indique plusieurs études. En effet, une annonce de détection de ces modes longtemps recherchés est parue (Fossat et al. 2017), suivie d'autres publications sur le sujet (Fossat & Schmider 2018, Schunker et al. 2018, Appourchaux et al. 2018) dont certaines discutent cependant la validité du résultat. Détecter ces oscillations de faible amplitude, qui nous renseignent sur le cœur du Soleil, a été possible en combinant les 22 ans d'observations de l'instrument GOLF et une méthode de détection indirecte (la signature de l'influence des modes g dans le spectre des modes de pression). Si cette détection est confirmée, il en ressortirait que le cœur du Soleil tourne presque 4 fois plus vite que l'enveloppe radiative.

Des progrès majeurs sur les processus de dynamo fluide à l'origine du magnétisme solaire ont également été obtenus. Il a notamment été montré par Strugarek et al. (2017) comment les interactions non linéaires au sein du Soleil permettent d'établir un cycle magnétique avec un renversement de la polarité du champ sur une période proche de 11 ans, et de générer des rubans magnétiques à l'origine des taches solaires.

Bien qu'arrêté en 2014, les données du satellite PICARD ont continué à être exploitées et ont permis de mieux contraindre le spectre solaire et sa variabilité (Meftah, 2017,2018a) ainsi que la détermination précise du rayon solaire à plusieurs longueurs d'onde (Meftah, 2018b). Les données de PICARD sont venues rejoindre celles de SOHO et de SDO dans la base MEDOC (https://idoc.ias.u-psud.fr/MEDOC), pour un total de presque un demi pétaoctet (464 To) de données actuellement disponibles. MEDOC s'est également enrichi d'outils pour mettre en valeur et exploiter les données : nouvelle interface, données à valeur ajoutée, outils pour la sélection et la lecture et outils de visualisation.

Dans le domaine de la physique solaire à haute énergie, la communauté a poursuivi l'exploitation des données de RHESSI (décommissionné en 2018) et se prépare à l'exploitation des données de STIX (Spectro imageur X à bord de Solar Orbiter). La première comparaison des sites d'émissions X observés par RHESSI avec des cartes de courants électriques photosphériques déduites des mesures de champ magnétique vectoriel de SDO/HMI a permis de souligner le rôle de ces courants et de la reconnexion magnétique pour l'accélération des électrons dans la couronne solaire (Musset, Vilmer, Bommier, 2015). La combinaison des observations de spectro-imagerie X de RHESSI avec des diagnostics radio du rayonnement gyrosynchrotron des électrons a permis de mettre en évidence un transport « diffusif » des électrons dans la couronne et d'étudier pour la première fois l'évolution du libre parcours moyen diffusif des électrons avec leur énergie (Musset, Kontar, Vilmer, 2018). En préparation de l'exploitation de STIX, des simulations numériques des émissions X thermiques et non thermiques

produites lors de l'évolution d'une boucle fortement torsadée ont été développées (Pinto et al. 2015 ; Pinto et al., 2016).

Ces dernières années ont également vu une progression de l'assimilation des données satellitaires dans les modèles de variabilité solaire, de vent et d'éruptions solaires. Des techniques de triangulation (Rouillard et al. 2016) appliquées sur les données de STEREO, SoHO et SDO, combinées avec une modélisation de la couronne (Pinto & Rouillard 2017), ont permis d'obtenir les propriétés 3-D du choc (vitesse, Mach, géométrie) associé à la propagation des éjections de masse coronales (CMEs) de la couronne au milieu interplanétaire et d'étudier l'origine des particules solaires énergétiques (Plotnikov et al. 2017).

Les données de SoHO et SDO ont permis de faire des avancées significatives sur le chauffage de la couronne solaire. La découverte et la modélisation de pulsations de grande période (plusieurs heures) dans les boucles de champ magnétique (Auchère et al. 2014, haut de la fig. 1; Froment 2015) ont montré que ces pulsations sont la signature d'un état dit de ''non-équilibre thermique'' (TNE), un cycle limite de remplissage/vidage des boucles magnétiques qui cherchent un équilibre sans pouvoir le trouver. Ce régime était connu dans les simulations numériques mais sa présence sur le long terme n'avait jamais été mis en évidence jusqu'à présent (Froment et al. 2015, 2018). Ce phénomène de pulsations observées dans l'EUV a par ailleurs été réunifié avec celui déjà connu de « pluie coronale ». Les modèles numériques indiquaient effectivement que ces deux phénomènes sont simplement deux manifestations du même processus physique sous-jacent de TNE, mais la confirmation, via l'observation de plusieurs événements de pluie coronale périodique se produisant en phase avec des pulsations d'intensité EUV, n'a été que récemment obtenue (Auchère et al. 2018, bas de la fig. 1). Ces nouvelles observations indiquent de manière indubitable que dans ces cas de pluie coronale et pulsations EUV, le chauffage des boucles est très stratifié et quasi-constant.

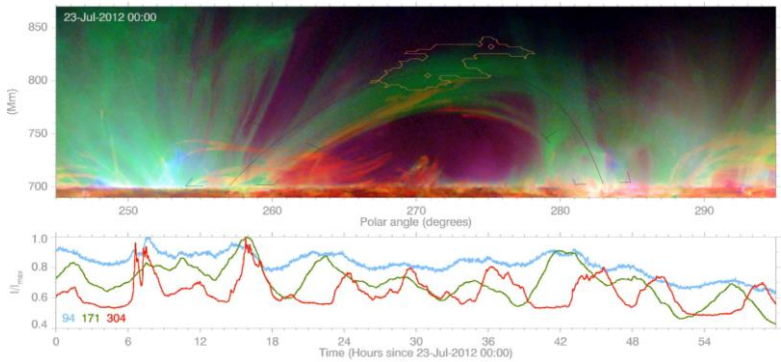


Figure 1: Pulsations d'intensité et pluie coronale périodique observée avec SDO/AIA (Auchère et al. 2018)

La communauté s'est également investie dans de nouveaux projets d'étude de l'atmosphère solaire, avec les vols de la fusée CLASP. CLASP est une expérience suborbitale (fusée sonde) dont l'objectif est de dériver le champ magnétique dans les couches élevées de l'atmosphère solaire à partir de mesures spectro-polarimétriques de la raie Lyman alpha de l'hydrogène neutre (121.6 nm), ouvrant ainsi la voie à un nouveau champ d'étude. L'instrument, dont l'IAS est co-PI, a pu acquérir toutes les données prévues lors du vol du 3/9/2015 et leur qualité est parfaite. Plusieurs publications décrivent les premiers résultats (Trujillo Bueno et al. 2018, Ishikawa et al. 2017, Schmidt et al. 2017, Giono et al. 2017, Kano et al. 2017, Narukage et al. 2017, Kubo et al. 2016). Un nouveau vol de fusée est prévu en avril 2019.

La communauté SHM est fortement impliquée dans les missions Parker Solar Probe (NASA, lancé le 12 août 2018), pour laquelle la France est le seul pays non américain à fournir une contribution hardware (capteurs magnétiques et électronique SCM –ASIC pour analyseur plasma). Cette mission a réalisé avec succès son premier rendez-vous avec le Soleil, à environ 24 millions de kilomètres de la surface le 4 novembre 2018. L'ensemble des instruments fonctionne nominalement, les premiers résultats de ce premier passage au plus proche devraient donc être très prochainement publiés

La préparation de SOLAR ORBITER (lancement en 2020, ESA) a notamment représenté une activité importante des laboratoires, couronnée par la livraison des instruments de vol au printemps 2017. La communauté française a fourni des contributions instrumentales importantes pour les instruments in situ et Remote Sensing : RPW (PI), SWA (co-PI), EUI (co-PI), STIX (Co-I), et PHI (Co-I). En plus de sa contribution au développement de SPICE, la France est également devenue PI de cet instrument pour la phase d'opération avec la responsabilité du développement du segment sol. Il y a également une forte implication française dans les groupes de travaux préparant l'analyse conjointe des données in-situ et Remote Sensing et des efforts de modélisation (MADAWG, Rouillard et al. 2019).

L'exploitation combinée des données, dont une grande partie est distribuée en France par plusieurs centres (CDPP, MEDOC et BASS 2000), est bien sûr une source de difficultés et requiert un important effort technique aux équipes ou chercheurs désirant s'investir dans des études multipoints et multi-instrumentales. Les services d'observations STORMS (http://storms-connectsolo.irap.omp.eu/), CDPP (https://cdpp-archive.cnes.fr/) et MEDOC (https://idoc.ias.u-psud.fr/MEDOC) ont ainsi défini et suivi le développement d'un outil web interactif appelée l'outil de propagation (http://propagationtool.cdpp.eu/, Rouillard et al. 2017) qui permet de mettre de corréler des données d'imagerie (ex. STEREO, SDO, SoHO) aux mesures in situ. A partir d'un résultat de propagation, l'outil permet d'interroger les centres de données entre le CDPP (outil AMDA, http://amda.irap.omp.eu/) et le centre des données solaires MEDOC à l'IAS (Helioviewer, https://helioviewer.ias.u-psud.fr/). L'outil de propagation est à présent disponible par le biais du portail SSA (https://www.esa.int/Our_Activities/Operations/Space_Situational_Awareness).

La préparation de Parker Solar Probe (PSP) et Solar Orbiter SolO) s'est également accompagnée de nombreuses études du plasma héliosphèrique se basant sur les données des missions spatiales comme CLUSTER, THEMIS, WIND, HELIOS (et la partie magnétosphérique pour MMS, qui n'a commencé à observer le vent solaire que récemment) et des simulations numériques. Une attention particulière a été portée sur le rôle des fluctuations Alfvéniques dans la zone inertielle de la turbulence, dont l'amplitude augmente en se rapprochant du Soleil (Matteini et al., 2014,2015 ; Montagud-Camps et al., 2017), ainsi que sur l'influence des ondes, des instabilités du plasma et les structures cohérentes aux échelles ioniques et électroniques sur le spectre de turbulence (Lion, et al., 2016 ; Passot & Sulem, 2017 ; Kobayashi et al., 2017, Perrone et al., 2016, 2017 ; Lacombe et al., 2017), ou l'influence des fluctuations compressibles sur le taux de chauffage turbulent dans les vents solaires lents et rapides (Banerjee et al., 2016 ; Hadid et al., 2017, voir aussi le fait marquant de la section "Magnétosphères terrestre et planétaires).

Les instruments radio de WIND et STEREO, développés en France, ont permis des études originales notamment sur :

1. Les micros et nano-poussières dans le milieu interplanétaires (Malaspina et al. 2014 ; Meyer-Vernet et al. 2015 ; Schippers et al. 2015),
2. La physique non linéaire des plasmas spatiaux notamment pour expliquer l'origine des émissions électromagnétiques liées aux éruptions solaires ou chocs interplanétaires (Briand et al. 2014),
3. Les diagnostiques très précis de la densité et température électronique dans le vent solaire conduisant à la détermination grande échelle du vent solaire (LeChat et al. 2015 ; Martimovic et al. 2016),
4. La localisation des sources d'émission radio (Krupar et al. 2014).

A noter que le point (2) est étudié grâce à des expériences sur les installations laser LULI2000 (LULI/Polytechnique) menées en Septembre 2018 et qui permettent de tester l'efficacité des processus d'émission.

2.3 Environnements Terrestre et Planétaires

Sur cette période, l'actualité scientifique a été très riche en termes :

1. De résultats scientifiques obtenus à partir des missions spatiales en cours d'exploitation,
2. De lancement de nouvelles missions,
3. Et de préparations de missions futures.

a) Magnétosphère terrestre

Le satellite DEMETER, première plateforme de la filière Myriade, a été passivé début 2011 après 6 années d'opérations mais l'exploitation des données scientifiques est encore active aujourd'hui. De nombreux types d'ondes d'origine humaine ont été observés par ce satellite. Cela concerne les ondes émises par les émetteurs TBF et EBF (Parrot et al., 2015; Boudjada et al., 2017), les stations de radio (Parrot et al., 2015), le rayonnement 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). 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 et il a été constaté que de nouvelles émissions pouvaient être déclenchées (Parrot et al., 2014; Němec et al., 2017). Ces études concernent aussi les phénomènes qui ont lieu dans l'atmosphère terrestre et qui modifient l'ionosphère (De Santis et al., 2016) incluant l'activité orageuse (Bourriez et al., 2016; Błęcki et al., 2016).

Concernant la magnétosphère terrestre et le vent solaire proche, la mission Cluster (prolongée par l'ESA jusqu'en 2020) fournit toujours des données d'excellente qualité qui ont permis de réaliser de nouvelles avancées dans la compréhension de l'interaction de la magnétosphère avec le vent solaire. Grâce au programme « Guest Investigator » des nouvelles échelles ou régions ont été explorées en réalisant des manœuvres sur les satellites. C'est le cas par exemple de l'exploration de la magnétosphère interne qui a permis d'expliquer l'origine du bruit équatorial (Balikhin et al., 2015) ou de l'exploration des petites échelles de la turbulence dans le vent solaire grâce aux séparations d'à peine quelques kilomètres entre deux satellites (Alexandrova et al., 2018).

L'exploitation des données de la mission THEMIS/ARTEMIS s'est poursuivie avec l'étude de la queue de la magnétosphère, du vent solaire proche (Hadid et al., 2018) et son interaction avec la lune (avec 2 des 5 satellites). Comme illustré par la Figure 2, le taux de chauffage turbulent dans la magnétogaine (plasma fortement compressible) est environ 100 fois supérieur à celui dans le vent solaire (plasma faiblement compressible). De plus une loi reliant le taux de chauffage avec le nombre de Mach sonique a pu être établie et pourra être appliquée à des objets astrophysiques plus lointains (Hadid et al. 2018).

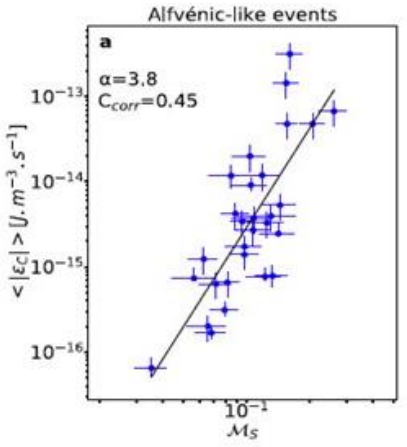


Figure 2a:Loi empirique liant le taux de chauffage turbulent au nombre de Mach sonique

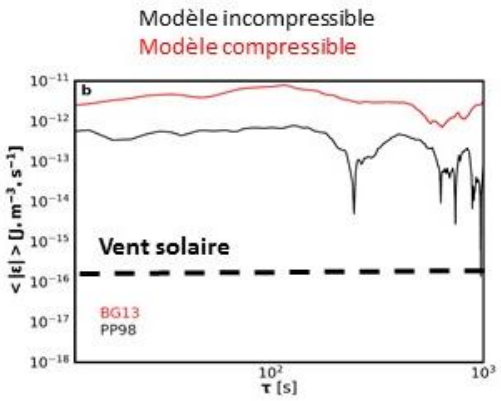


Figure 2b:taux de chauffage turbulent dans la magnétogaine (plasma fortement compressible et incompressible)

Figure 2 : 1ère estimation du taux de chauffage turbulent dans la magnétosphère terrestre à l'aide des données Cluster et Themis

L'actualité a été marquée par le lancement de la mission MMS (Magnetospheric MultiScale) de la NASA en mars 2015 dans laquelle la communauté française a des contributions hardware. Cette mission phare de la NASA est similaire à la mission Cluster avec ses 4 satellites volant en formation tétraédrique, mais séparés d'environ 10 km donc proches de l'échelle spatiale des électrons (contre 100 km ou plus pour Cluster). MMS a pour objectif principal l'étude de la reconnexion magnétique (notamment la région de diffusion électronique) à la magnétopause, interface d'interaction entre le vent solaire et la magnétosphère. Cette mission donne une moisson de nouveaux résultats sur la reconnexion magnétique (Lavraud et al., 2016 ; Zhang et al. 2016; 2017; Kacem et al. 2018 ; Vernisse et al. 2016 ; Phan et al. 2018), sur les processus d'accélération et de chauffage du plasma, ainsi que sur les structures turbulentes à très petite échelle (ex. vortex électronique (Huang et al., 2017 ; Le Contel et al., 2017). Ces découvertes ont été rendues possibles grâce notamment aux mesures du plasma à très haute cadence (150 ms pour les fonctions de distribution en vitesse 3D des ions et 30ms pour les électrons contre 4 s avec Cluster), et aux mesures des 3 composantes du champ électrique (contre 2 dans le cas de Cluster).

TARANIS est prévue pour être lancé en 2020 ; la réalisation des instruments et la préparation scientifique de la mission ont mobilisé de nombreuses équipes françaises sur la période 2014-2018. Ce satellite permettra d'observer, depuis l'orbite basse, des TGF (de brèves, environ 100 µs, et intenses bouffées de rayons gamma) résultant de la production de rayonnement de freinage par des électrons de haute énergie dans des nuages orageux. Des études théoriques ont été réalisées pour expliquer les phénomènes d'accélération des électrons pouvant donner lieu à ces TGF. On peut noter en particulier les travaux sur la variabilité du spectre gamma (Celestin et al., 2015 ; Cramer et al., 2017) et sur les émissions optiques à la source des TGF (Xu et al., 2015).

La mission Swarm de l'agence spatiale européenne (ESA), constellation de trois satellites identiques, permet l'étude du champ magnétique, de l'atmosphère et de l'ionosphère terrestre. Les trois satellites ont été lancés simultanément le 22 novembre 2013. La communauté française participe activement à ces travaux. Par exemple, on peut noter l'utilisation simultanée des données Swarm et celles du Radar EISCAT du Svalbard (Pitout et al., 2015) ainsi que l'étude des variations ionosphériques et thermosphériques dues à l'orage magnétique du 22-23 juin 2015 en utilisant des récepteurs GNSS et les données des 3 satellites Swarm (Astafyeva et al. 2015, 2018) qui a permis d'en établir les causes liées à des augmentations et des diminutions de l'ionisation.
Des mesures des paramètres ionosphériques peuvent être aussi utilisées pour la détection des catastrophes naturelles (Occhipinti 2015 ; Shults et al. 2016). Il est déjà connu que des tremblements de terre, des tsunamis, des éruptions volcaniques génèrent des perturbations ionosphériques via des ondes acoustiques et de gravité. Basées sur des observations des perturbations ionosphériques co-sismiques et co-tsunamiques, plusieurs méthodes ionosphériques ont été proposées récemment pour l'alerte des tsunamis en temps quasi-réel (Kamogawa et al., 2016, Savastano et al., 2017). En plus de la détection des perturbations ionosphériques dues aux catastrophes naturelles, il a été démontré qu'il est possible de détecter la source des catastrophes naturelles à partir des perturbations sur l'ionosphère, et de déterminer la position et les dimensions de la source sismique. Il a été montré que cette méthode appelée « imagerie sismo-ionosphérique » est applicable aussi bien pour les séismes géants (magnitude M~9.0, Astafyeva et al., 2011; 2013) que pour des évènements plus petits (magnitude M~7.0, Astafyeva and Shults, 2019). Le sondage ionosphérique permet également d'estimer l'amplitude du tsunami avec une précision proche des celle des boues océaniques (Rakoto *et al.*, 2018).

Mais l'actualité a été également marquée par la forte participation de la communauté dans l'étude de Phase A de la mission THOR dans le cadre de l'AO M4 du programme Cosmic-Vision de l'ESA. Cette mission était dédiée à l'étude de la turbulence et des processus de dissipation d'énergie aux très petites échelles dans la magnétosphère et le vent solaire proche.

Malgré la non-sélection de THOR à l'issue de la Phase A, un gros travail fourni par les équipes (avec le fort soutien du CNES) a permis d'aboutir à des prototypes de nouveaux instruments ayant de grandes performances (sensibilité, haute résolution, etc.). Le travail de maturation de ces instruments se poursuit au sein des équipes afin qu'ils puissent être proposés dans les réponses aux prochains AOs.

b) Magnétosphères planétaires

A l'instar de la magnétosphère terrestre, le travail d'exploration des magnétosphères planétaires (Mars, Saturne, Jupiter et Mercure) a été marqué par plusieurs événements importants.

La mission MAVEN de la NASA permet depuis 2015 d'obtenir d'excellentes mesures du plasma dans la magnétosphère induite de Mars et dans son environnement proche (Romanelli et al. 2018; Jakosky et al. 2018).

L'exploitation de Mars Express a continué avec en particulier des résultats sur la dynamique des frontières de la magnétosphère induite de Mars sur une grande période de temps, Mars Express ayant maintenant accumulé des données sur plus d'un cycle solaire. Par ailleurs, des études conjointes avec MAVEN ont été menées notamment sur l'événement solaire exceptionnel de septembre 2017 (CME et flares).

La mission JUNO, insérée en orbite autour de Jupiter en 2016 permet, elle, de mieux comprendre les processus d'émission d'ondes radio de l'environnement plasma jovien (Louarn et al., 2017; 2018; Louis et al. 2017a et 2017b).

L'exploration d'autres objets du système solaire offre l'opportunité d'observer d'autres formes de couplage entre magnétosphère, ionosphère et atmosphère. Par exemple, les missions d'observation de l'environnement martien, comme Mars Express ou MAVEN, ont mis en évidence l'échappement atmosphérique permanent induit par l'interaction entre le vent solaire et l'atmosphère/ionosphère de Mars (Ramstadt et al. 2015; 2017). MAVEN a pu observer la dépendance de l'échappement ionosphérique en fonction des conditions solaires ou lors d'un événement solaire (Jakosky et al., 2018). Les processus rétroactifs qui contrôlent cette interaction ont pu être mis en évidence, comme par exemple, le ralentissement du vent solaire par les ions planétaires (Rahmati et al., 2017) et la formation de courants dans la magnétopause et dans l'ionosphère (Romanelli et al., 2018).

La mission CASSINI a aussi été l'occasion d'observer d'autres formes de couplage autour de Titan (Béghin, 2014) et plus généralement dans la magnétosphère de Saturne (Roussos et al. 2018; Lamy et al. 2018). La fin de la mission CASSINI en 2017, soldée par un plongeon (Grande Finale) dans l'atmosphère de Saturne a permis notamment une première caractérisation in-situ de l'ionosphère de la planète (Lamy et al. 2018; Roussos et al. 2018).

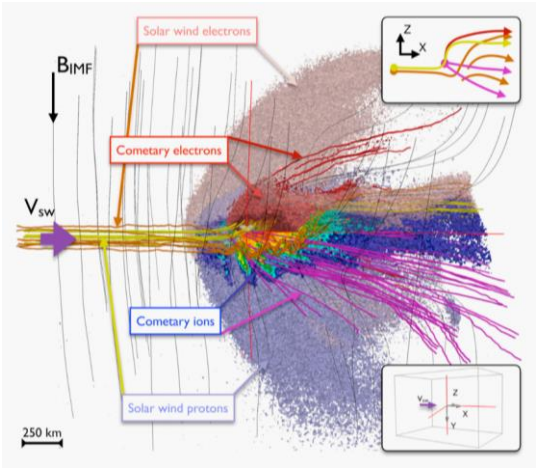


Figure 3:Illustration 3D du comportement de 4 espèces fluides lors l'interaction du vent solaire avec une comète avec une activité faible. La taille de la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko a été augmentée d'un facteur 5 pour la rendre plus visible. L'insert supérieur montre comment les mouvements des 4 espèces sont découplés dans le plan XZ perpendiculaire au champ magnétique interplanétaire (d'après Deca et al. 2017).

Comme illustré par la Figure 3, la mission Rosetta a permis de mettre en évidence les processus physiques à l'origine de l'apparition d'une ionosphère cométaire et d'une magnétosphère induite à travers la compétition entre différents processus d'ionisation, l'effet du *mass loading* du vent solaire, et le processus d'expulsion du vent solaire et du champ magnétique interplanétaire de l'environnement ionisé cométaire (Henri et al. 2018; Heritier et al. 2018a and b; Behar et al. 2018; Hajra et al. 2018 pour les plus récents).

Outre l'exploitation des missions en vol, BepiColombo lancé le 19 octobre 2018 poursuit nominalement son voyage, et s'insèrera vers décembre 2025, après 7 ans de croisière, sur une orbite autour de Mercure. La communauté française est fortement impliquée au niveau hardware dans les deux satellites MPO (sous responsabilité de l'ESA) et MIO (anciennement MMO, sous la responsabilité de la JAXA).

Enfin les développements instrumentaux continuent à être menés avec succès dans le cadre de la mission JUICE (Jupiter Icy Moon Explorer) dont le lancement vers Jupiter est prévu en 2022 et une insertion en orbite en 2029.

2.4 Météorologie de l'Espace

La Météorologie de l'Espace (ME) vise *in fine* la prévision de l'impact d'événements solaires sur l'environnement spatial de la Terre et des infrastructures industrielles tant dans l'espace que sur Terre. 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 bilans des atouts observationnels, numériques et techniques fournis par la communauté SHM et utiles aux efforts nationaux et internationaux en ME ont été récemment publiés. Une transition entre la recherche fondamentale et ses applications en ME nécessite un travail important afin de rendre les modèles et les outils scientifiques suffisamment performants pour répondre aux contraintes opérationnelles. Pour cela, des techniques souvent peu utilisées en recherche fondamentale (assimilation des données, l'apprentissage automatique) peuvent être combinées aux outils existants afin 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 aux besoins.

a) Au service des utilisateurs

Suite à la dynamique mise en place par la communauté SHM et des discussions au sein du GCME (Groupe de Coordination en Météorologie de l'Espace), 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 française passe par une participation des centres de données CDPP et MEDOC sur l'aspect fourniture de données et outils d'interprétation.

Les modèles numériques simulant les sous-systèmes du milieu Soleil-magnétosphère développés par la communauté SHM sont reconnus mondialement. Afin de soutenir des synergies entre modèles issus de la communauté SHM et ceux d'autres équipes européennes dans une perspective de développer les modèles météorologiques du futur, le CNES soutient depuis peu ces aspects du programme ESA-GSTP.

La communauté SHM mène de nombreuses coopérations avec les utilisateurs de la ME (instances nationales, industriels) :

- L'Observatoire de Paris s'est impliqué dans la création du centre météorologique expérimental FEDOME de l'Armée de l'Air exploitant les données issues d'observatoires sols et espaces.
- Une coopération entre l'Observatoire de Paris, l'aviation civile et l'IRSN existe depuis presque 20 ans pour fournir des outils tels que le système SIEVERT (https://www.sievert-system.org) qui permet de calculer les doses de radiations (provenant du rayonnement cosmique) reçues par le personnel navigant.
- Des indices solaires ont été développés récemment par le LPC2E pour les besoins opérationnels 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).

La communauté SHM participe régulièrement à des projets financés par l'Europe qui visent à améliorer les techniques et modèles en ME. Des projets récents sont H2020-FLARECAST, FP7-HELCATS, H2020-HESPERIA, ERC-Solar Predict, ORME, FP7-SOLID, H2020-SWAMI.

Un consortium de Météo France, ESSP, CLS, coordonné par la DGAC, a répondu avec succès à un AO de l'OACI pour un service mondial de météorologie de l'espace au bénéfice de l'aviation civile (consortium associant la France, le Canada, l'Australie et le Japon). La communauté SHM a soutenu scientifiquement ce projet, par le conseil, la formation et la fourniture de services dans des domaines spécifiques. Notre participation est perçue comme un atout essentiel de ce projet.

Notre communauté développe des instruments sol et des services mettant à disposition des données et des résultats de simulations permettant d'établir l'état actuel ou futur du système Soleil-Terre. Ces services visant à améliorer les prévisions en ME sont labellisés par l'INSU comme Action Nationale 6 (http://www.insu.cnrs.fr/node/1234).

b) Des modèles scientifiques reconnus

L'expertise de la communauté SHM en ME est très large. De nombreuses avancées ont vu le jour entre 2014 et 2018 et il n'est pas possible ici d'en faire un bilan détaillé, mais voici quelques résultats :

- L'assimilation des données solaires visant la prévision des éruptions CMEs (Amari et al. 2014),
- Le déploiement de nouveaux modèles de l'ionosphère permettant une description à la fois locale et globale des propriétés ionosphériques (Marchaudon et Blelly 2015; Marchaudon et al., 2018)
- La prévision de l'amplitude du prochain cycle solaire (Hung et al. 2015, 2017).

Les premières prévisions du vent solaire à 1AU sont maintenant possibles à partir de modèles physiques simulant le plasma de la photosphère à 1AU. Jusqu'à maintenant les prévisions du vent solaire ont été basées sur des relations empiriques reliant la vitesse terminale du vent solaire à 21 rayons solaires (Rs) aux propriétés du champ magnétique solaire. Ces lois empiriques sont utilisées comme conditions limites des modèles 3-D MHD (ex. EUHFORIA et ENLIL) de propagation du vent solaire à 21.5Rs qui propagent ensuite le plasma à la Terre. Au travers du projet CNES-SWIFT, le modèle physique de vent solaire MULTI-VP (Pinto and Rouillard 2017) fournit des prévisions du plasma solaire et interplanétaire du Soleil à la Terre.

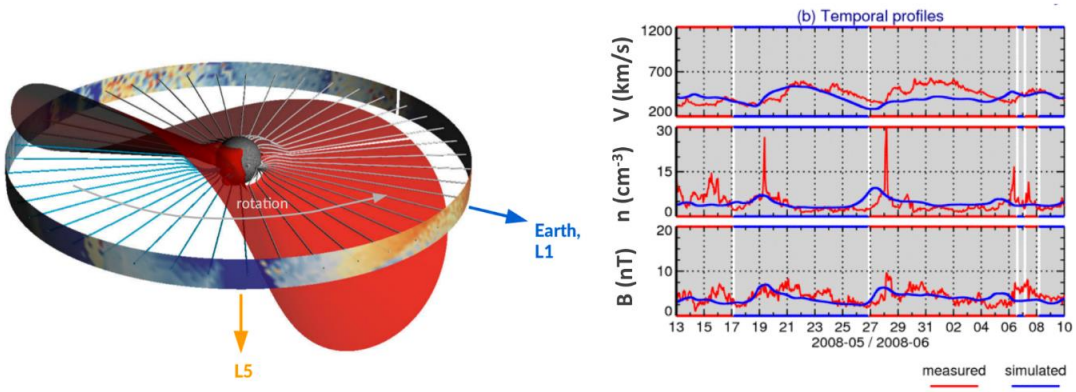


Figure 4:A gauche: simulations du vent solaire dans l'écliptique obtenues à partir du modèle MULTI-VP. Le bandeau de couleur représente la distribution en longitude de la vitesse du vent solaire (bleu= 300 km/s, orange= 600 km/s). A droite : la comparaison des propriétés du vent solaire à la Terre du modèle MULTI-VP avec les mesures in situ d'OMNI

c) *Une nouvelle structure française OFRAME*

Plusieurs membres de la communauté SHM ont 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 dont le mandat s'est terminé en 2016. Un nouveau Groupe de Coordination en Météorologie de l'Espace (GCME) du CNES a pris le relais et vise à offrir un lieu d'échange entre les responsables du CNES en ME, les instances nationales, industriels et chercheurs.

Afin de structurer la recherche française, l'INSU, le CNES, le CEA et l'ONERA ont créé en 2017 l'Organisation Française pour la Recherche Applicative en Météorologie de l'Espace (OFRAME). L'OFRAME vise à fédérer les activités de ME au sein de la communauté scientifique française. Des actions concrètes peuvent être ainsi menées permettant un réel échange entre les chercheurs et les utilisateurs de la ME telle que la formation d'ingénieurs et de chercheurs voulant s'impliquer en ME. Des informations supplémentaires sur l'OFRAME sont maintenant disponibles sur son site web : http://meteo-espace.fr/

La communauté SHM est très impliquée dans l'organisation des réunions clé en ME comme la « European Space Weather Week », le Journal of Space Weather and Space Climate (éditeur : J. Lilensten), l'organisation d'ateliers dédiés aux problématiques de la ME au sein de la communauté SHM, des réunions ME entre METEO FRANCE, la DGAC et les communautés SHM et INSU.

3. PROSPECTIVE

3.1 Objectifs Scientifiques

a) Physique du Soleil et de l'Héliosphère

L'étude du fonctionnement et de la variabilité de notre étoile et de comment celle-ci contrôle le milieu interplanétaire est un enjeu majeur tant pour nos sociétés que pour comprendre les processus fondamentaux à l'œuvre dans les milieux astrophysiques.

Les missions **Parker Solar Probe** (PSP, NASA, lancé le 12 août 2018) et **Solar Orbiter** (SolO, ESA, lancement en 2020) vont permettre une étude approfondie des **processus fondamentaux qui gouvernent l'héliosphère** en observant le Soleil au plus près et en faisant le lien entre les évènements solaires et leurs signatures dans l'héliosphère. Ces missions permettront ainsi de contribuer à comprendre les problèmes suivants, fondamentaux pour comprendre comment l'influence du Soleil sur les planètes :

Quelle est la source du champ magnétique et des vents solaires qui remplissent l'héliosphère ?
Comment les éruptions solaires produisent les particules énergétiques ?
Comment les éjections de masse coronale se déclenchent et se propagent ?
Comment la dynamo solaire et son cycle sont-ils générés ?

La France est fortement impliquée dans ces deux missions et est notamment le seul pays non américain à fournir de l'instrumentation pour la mission Parker Solar Probe (capteur magnétique SCM, électronique de détection pour l'analyseur d'électrons), qui est déjà, depuis le premier périhélie qui a eu lieu le 6 Novembre 2018, l'objet le plus proche du Soleil envoyé par l'homme. PSP va progressivement se rapprocher du Soleil à chaque orbite (tous les 6 mois), jusqu'à atteindre une distance d'environ 9 rayons solaires en 2024. Parker Solar Probe mesure *in-situ* les paramètres du plasma lorsqu'il est au plus proche du Soleil.

Ces mesures seront complétées par celles de Solar Orbiter qui mesurera les paramètres du plasma tout le long de son orbite et réalisera également des mesures de télédétection (imagerie, spectroscopie, magnétométrie de la surface...) au plus proche du Soleil. La France contribue fortement à la mission SolO via sa participation aux instruments suivants : RPW (champs électrique et magnétique, PI), SWA (particules, co-PI), EUI (imageur EUV, co-PI), STIX (rayonnement X Co-I), PHI (imageur visible et magnétographe Co-I), SPICE (spectromètre UV, PI). Elle dirige également le groupe MADAWG qui est en charge de préparer l'analyse conjointe des données *in-situ* et de télédétection qui font la spécificité de Solar Orbiter.

Globalement, l'étude de comment le Soleil contrôle l'héliosphère nécessitera l'analyse croisée de données issues de différentes sources : PSP et SolO, mais également de missions plus anciennes - SOHO, STEREO, ACE- et d'observatoires au sol comme par exemple l'observatoire de Nançay. Les missions actuellement envisagées en L1 (SWFO de la NASA) et L5 (le projet LAGRANGE de l'ESA/SSA ou une mission scientifique américaine de la NASA) devront également être prises en compte. Ces analyses nécessiteront l'utilisation de plusieurs outils en développement en France (CDPP, MEDOC, par exemple le *Propagation Tool*, Figure 4*)* ainsi que de modèles numériques de déclenchement et propagation des transitoires solaires.

Notons que le fonctionnement de Parker Solar Probe et Solar Orbiter différera de ce que la communauté a connu avec les missions précédentes (SoHO, WIND, STEREO, ..) car la réception des données et la préparation des opérations se fera sur des plages de temps réduites et les sondes opéreront de façon autonome lors des passages proches du Soleil.

A plus long terme, le projet de mission **ICARUS** vise à **s'approcher à 1 rayon solaire ou plus de notre étoile** ; il bénéficie actuellement d'une étude avec le soutien du PASO pour préciser le concept d'une telle mission qui permettrait de mesurer le chauffage et l'accélération du plasma au plus proche de la source.

D'autres questions fondamentales pour l'étude du Soleil et de l'Héliosphère ne seront que partiellement couvertes par ces deux grandes missions solaires

Quel est le rôle des couches profondes du Soleil sur son magnétisme ?

Le champ magnétique qui gouverne l'héliosphère prend sa source à l'intérieur du Soleil. **L'héliosismologie est un des outils indispensables pour comprendre la dynamo et sa cyclicité**. Si l'instrument PHI de Solar Orbiter pourra sonder les couches externes, l'instrument GOLF à bord de SoHO (qui a donné lieu aux annonces passées de détection des modes dits de gravité) reste maintenant insuffisant pour confirmer et interpréter ces modes qui sont l'outil idéal pour sonder le cœur du Soleil.

Une instrumentation similaire pourrait être proposée en R&T (voir proposition AC115 de l'Appel à Idées) pour par exemple être placée au point de Lagrange L5 (ou autre point de Lagrange), ce qui permettrait de déterminer le profil de rotation jusqu'au cœur, dont la rotation est un élément décisif dans la dynamo.

Solar Orbiter permettra des progrès notables en permettant des visées jusqu'à 35 degrés de latitude solaire, mais pendant des durées très limitées. **L'observation des pôles du Soleil** pendant de longues périodes reste donc une priorité à l'avenir. Le projet de mission **SOLARIS** sera proposé dans le cadre de l'appel d'offres Midex de la NASA en septembre 2019, la sélection ayant lieu début 2020. Ce projet propose d'embarquer un magnétomètre, un imageur EUV et un coronographe sur une orbite polaire.

Comment la chromosphère et la couronne sont-elles chauffées et quel est leur rôle dans la dynamique de l'atmosphère solaire ?

Répondre à cette question nécessite d'une part de faire un **saut significatif dans la résolution spatiale et temporelle des observations de la chromosphère**, et d'autre part de **mieux contraindre le champ magnétique dans l'atmosphère solaire**, qui reste largement méconnu en dépit de son rôle fondamental.

Le premier point constitue le principal objectif de la mission japonaise de physique solaire **SOLAR-C** (Jaxa), qui a été sélectionné en juillet 2018 pour une phase A compétitive (sélection finale en 2019), et pour laquelle la France pourrait fournir le réseau de diffraction du spectromètre qui est l'instrument clé de la mission.

Le deuxième point est une conséquence du fait que notre connaissance actuelle du champ magnétique coronal est principalement basée sur des extrapolations de mesures faites au niveau de la photosphère et non sur des mesures directes. Mais ces extrapolations requièrent de fortes hypothèses sur des grandeurs critiques non observées ainsi que sur de délicates mesures du champ transverse, et n'arrivent donc pas à reproduire correctement les topologies complexes et la dynamique déduites des observations télescopiques. Les extrapolations ne peuvent simplement pas remplacer des mesures. La communauté héliophysique internationale a, à plusieurs reprises, identifié l'absence de mesures directes du champ magnétique comme un verrou limitant fortement nos capacités de diagnostic.

Pour pallier ce manque, une instrumentation dédiée est nécessaire. Un coronographe permettant des mesures du champ magnétique coronal a été développé à l'IAS dans le cadre du projet franco-chinois SMESE (2006-2008). Si le projet a été interrompu en fin de phase A, les développements instrumentaux ont été poursuivis, en particulier avec la fusée sonde CLASP. Le projet **MASC**, soumis à l'appel à idées, propose d'implémenter un coronographe permettant pour la première fois des mesures systématiques du champ magnétique coronal.

Comment fonctionnent les mécanismes de chauffage turbulent des particules dans le vent solaire proche ?

Une des thématiques émergentes de ces dernières années est l'étude de la turbulence aux échelles sub-ioniques et électroniques et son rôle dans le chauffage turbulent des particules, notamment les électrons dans le vent solaire. Ce sujet, qui nécessite de distinguer les variations temporelles et spatiales, revêt un intérêt pour d'autres plasmas astrophysiques que ceux de l'héliosphère. Plusieurs modèles théoriques ont été développés et qui attendent maintenant d'être confrontés aux observations. Les échelles spatiales (~1km) et temporelles (quelques millisecondes) visées imposent des contraintes particulières sur l'instrumentation embarquée (haute résolutions temporelle, meilleures sensibilités, etc.).

Cette nouvelle thématique faisait partie des objectifs scientifiques de la mission THOR. Mais le concept de mission mono-satellite adopté ne permettait pas de résoudre l'ambiguïté spatio-temporelle ou de rendre compte de la nature intrinsèquement multi-échelles de la turbulence. Pour pallier ces insuffisances le projet **DEBYE** a été proposé à l'AO F1 de l'ESA et fait partie des 6 projets retenus pour la phase 2. DEBYE est un projet multi-satellites (satellite mère+filles) et vise en priorité l'étude des échelles électroniques du vent solaire proche (point de Lagrange L2) avec l'instrumentation adaptée.

Enfin, le contexte programmatique devrait également permettre aux laboratoires de s'engager plus fortement qu'avant dans des actions de R&T, notamment (mais pas uniquement) pour la réalisation d'instruments adaptés aux nano-plateformes. Outre les contraintes de dimensionnement et de propreté électromagnétique imposées par les nanosatellites aux instruments, il sera également intéressant d'étudier la potentialité de ces plateformes comme observatoire solaire à long terme via l'envoi récurrent de nanosatellites embarquant des instruments de mesures bien inter-étalonnés.

b) Environnements terrestre et planétaires

Comprendre la turbulence via l'étude multi-échelles des processus de physique des plasmas dans la magnétosphère terrestre

Les données des missions spatiales multipoints Cluster, Themis et plus récemment MMS (et dans une certaine mesure la mission *Van Allen probes* dédiée à l'étude des ceintures de radiations) ont permis de réaliser des avancées considérables dans la compréhension des processus plasmas dans différentes régions de la magnétosphère terrestre.

Parmi ces processus on peut citer la **reconnexion magnétique, la turbulence, l'accélération des particules et la physique des chocs**. Cependant, la nature intrinsèquement multi-échelles de ces phénomènes montre les limites des mesures actuelles. Par exemple, la mission Cluster permet d'étudier ces processus plasmas aux échelles fluides et ioniques grâce aux séparations variables entres ses satellites (100-4000 km) mais ne permettait pas d'explorer les échelles sub-ioniques ou électroniques où les processus de dissipation turbulente et de reconnexion magnétique se produisent.

La mission MMS permet maintenant de sonder ces échelles-là, mais elle perd l'information sur le contexte global (échelles fluides ou ioniques). Ces raisons étaient à l'origine de la proposition des missions **multipoints et multi-échelles** CROSS-SCALE et EIDO-SCOPE aux AO M1 et M2 de l'ESA, qui n'ont pas été sélectionnées (essentiellement pour des raisons de coût ou de complexité de montage).

Ceci oblige la communauté à se tourner vers des **concepts multi-satellites** moins couteux, ce qui pourrait peut-être se réaliser avec des plateformes nano-satellites. Dans cette optique, la communauté a répondu à l'AO F1 en proposant deux missions multi-satellites dédiées à la magnétosphère terrestre (Prospero) et au vent solaire proche (Debye, voir ci-dessus).

Comment l'énergie électromagnétique est convertie en énergie cinétique pour créer les aurores et déclencher l'échappement ionosphérique ?

Comprendre la nature des processus d'accélération dans la zone aurorale en lien avec les processus d'émissions radio terrestre (ou planétaire) était un des objectifs de la mission Alfvén (mission à deux satellites). Elle a été proposée aux AO M3, M4 et M5 de l'ESA mais n'a pas été retenue. Des projets similaires ont été proposés aux Etats-Unis sous le nom d'Ohmic. Cette mission devrait être proposée dans la cadre du prochain AO Midex de la NASA (attendu au printemps 2019).

Par ailleurs un nouveau concept de mission multipoints (tétraèdre similaire à Cluster ou MMS) a été proposé récemment pour **étudier en 3D les processus de reconnexion et déclenchement des sous-orages** dans la queue de la magnétosphère. Il s'agit du projet THEIA qui est une mission à deux satellites pour compléter la mission Themis (trois satellites qui explorent la queue de la magnétosphère terrestre). Cette configuration à 5 satellites permettra de mesurer entre autres le courant électrique par la méthode du « curlometer ». Cette mission a été proposée dans le cadre de l'AO MO (Mission of Opportunity) de la NASA en 2018, la présélection en Phase A compétitive interviendra à l'été 2019.

Etudier l'accélération des particules énergétiques via les émissions radio solaires et planétaires
Les émissions radios de basse fréquence donnent accès aux mécanismes d'accélération des particules très énergétiques dans les zones aurorales des magnétosphères des planètes géantes de notre système solaire et dans la couronne solaire. Elles permettent de suivre l'accélération de ces particules et de cartographier les régions d'accélérations des éjections de masse coronale dans la couronne solaire.

Une mission d'interférométrie radio, NOIRE, constituée d'un réseau de nano-satellites a été étudiée en phase 0 par le PASO CNES. Le but principal est d'**accéder à des gammes de fréquence quasi-inexplorées (1MHz-30MHz) en apportant de la résolution spatiale** à ces observations radio. Un large spectre de domaines scientifiques est concerné dont les émissions planétaires et héliosphériques. Ce projet intéresse également les cosmologistes.

Quels impacts du forçage solaire sur l'ionosphère et thermosphère terrestre ?
La caractérisation de l'ionosphère terrestre reste un enjeu majeur pour la relation entre notre étoile et notre atmosphère. L'observation de l'ionosphère a été l'objet de relativement peu de missions spatiales et les liens entre la structure et composition de cette région de notre atmosphère et les différents forçages solaires restent mal connus. Il existe certes de nombreux observatoires au sol et depuis l'espace de l'ionosphère. Mais, la composition chimique, la structure 3D et sa dynamique ne sont connus temporellement et spatialement que de façon parcellaire. Plusieurs projets de missions spatiales ont donc été proposés ces dernières années pour sonder cette région, souvent en s'appuyant sur les observatoires sol.

Le projet de mission DAEDALUS soumis à l'ESA se propose de mesurer in situ la basse thermosphère et l'ionosphère terrestre tandis que l'idée de mission NUAM se propose d'utiliser un réseau de nano-satellites pour cartographier depuis l'espace l'ionosphère terrestre. De la même manière, la mission nano-satellite CIRCUS souhaite tester une nouvelle approche pour sonder l'ionosphère terrestre. Enfin, le projet de mission FATE se propose de caractériser l'échappement ionosphérique induit par l'interaction de notre planète avec le Soleil.

Observer de manière plus systématique et continue l'ionosphère terrestre représente donc un des objectifs de la communauté pour les années à venir. Il existe également de nombreux travaux démontrant comment l'ionosphère se trouve perturbée par des événements majeurs à la surface de la Terre, comme des tsunamis ou éruptions volcaniques. Développer des capacités d'observation de tels phénomènes depuis l'espace est donc l'objet de plusieurs projets de missions spatiales. L'analyse des données GPS a ainsi démontré le grand intérêt de pouvoir obtenir une couverture globale et permanente de l'ionosphère. Aussi d'autres approches pour observer ces perturbations pourraient être envisagées dans les années prochaines, par exemple, l'utilisation de plateformes comme des ballons stratosphériques.

Quels sont les effets des flashs gamma terrestres (TGF) et des évènements lumineux transitoires (TLE) dans l'atmosphère et le proche environnement spatial ?

En se propageant vers l'espace, les photons des TGF (flash gamma terrestre) 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. Ceci ouvre de nouvelles perspectives dans l'étude des TGF et de leur impact dans le système atmosphère-ionosphère par l'observation des émissions optiques associées depuis le sol ou par satellite.

La future mission CNES TARANIS et l'expérience ASIM (ESA), récemment installée sur la Station Spatiale Internationale, ont adopté des stratégies d'observation au nadir. L'étude des évènements lumineux transitoires (TLE) par des observations au nadir est compliquée par le manque de résolution vertical inhérent à cette géométrie. Afin de résoudre ce problème une nouvelle technique basée sur une étude spectroscopique des émissions optiques a été proposée pour déterminer le champ électrique et l'altitude des filaments de plasmas formant les sprites à partir de mesures photométriques au nadir (Ihaddadene and Celestin, 2017). Cette technique est utilisable sur les données d'observation depuis le sol ou l'espace et sera appliquée aux résultats de l'instrument MicroCaméras et Photomètres (MCP) à bord de TARANIS.

En lien avec TARANIS, pour **étudier *in situ* les processus d'accélération d'électrons dans les nuages d'orages et les effets des TLE dans la haute atmosphère,** des projets de ballons complètent les mesures satellites: OREO (Observation du Rayonnement Energétique dans les Orages) sur Ballon sondes (BLD) et HALESIS (mesure de la signature infrarouge des TLEs)

Cette forme de collaboration entre le CTB, le GT SHM et le GT Atmosphère météo et climat du TOSCA vient donc enrichir l'ensemble des outils et des stratégies de recherches sur des sujets interdisciplinaires tel que celui de l'électricité atmosphérique et spatiale.

Notons également que les projets d'étude des éclairs grâce aux données satellites de plus en plus nombreuses (par exemple le projet SOLID soutenu par le TOSCA) permettront de préciser les mécanismes de couplage atmosphère-ionosphère.

Résoudre l'ambiguïté spatio-temporelle dans la dynamique des magnétosphères planétaires

Le succès des missions multipoints dans l'exploration de la magnétosphère terrestre incite fortement à adopter la même approche s'agissant des nouveaux projets d'exploration planétaire. La connaissance des environnements magnétisés des planètes déjà explorées et leur interaction avec le vent solaire (Mars, Mercure, Jupiter, Saturne ou comète) souffre des mêmes limitations que celles de la magnétosphère terrestre avant l'ère des missions multipoints.

S'agissant de Mercure, la mission BepiColombo devrait en partie combler cette lacune grâce à ses deux satellites MPO et MMO (ou MIO). Mais, à terme, il sera nécessaire d'avoir des plateformes et une instrumentation bien adaptée pour **l'exploration multipoints** permettant de faire à la fois du monitoring du vent solaire (qui donnerait les conditions en amont de la planète) et de l'exploration multipoints (similaire à Cluster ou MMS) de l'environnement magnétisé de la planète.

Pour Mars, les mesures multipoints de la magnétosphère et de la haute atmosphère (mesure directe de l'échappement atmosphérique neutre et ionisée) sont logiquement l'étape suivante pour pouvoir proprement séparer les processus relevant des échelles spatiales de ceux relevant des échelles temporelles. Comprendre comment une planète comme Mars réagit à des conditions solaires extrêmes d'un point de vue magnétosphérique et atmosphérique, passe donc par le **déploiement simultané de plusieurs plateformes, pour suivre des paramètres du vent solaire en amont, observer la structure et la réactivité de la magnétosphère martienne** à ces paramètres et caractériser simultanément leurs impacts sur la haute atmosphère martienne et son ionosphère. C'est l'objectif du projet de mission NETSSEM qui a été proposée récemment à l'AO Call F1 pour l'exploration de l'environnement magnétisé de Mars, mais sans succès. Ce projet bénéficie actuellement d'une étude

avec le soutien du PASO pour préciser le conceptd'une mission plus large dont l'objectif est l'étude de la magnétosphère martienne et de son interaction avec le vent solaire. Il s'appuie sur de l'utilisation des nanosatellites pour les mesures multipoints (cf. § 3.2.

Etude des géantes glacées

Uranus et Neptune sont probablement la prochaine étape clé de l'exploration planétaire, dans le système solaire externe. Ces deux géantes glacées n'ont été explorées qu'une seule fois, lors de leur survol respectif par la sonde Voyager 2 en 1986 et 1989, qui ont révélé des systèmes planétaires sans équivalents dans le système solaire. L'étude des systèmes d'Uranus et de Neptune pose de nombreuses et riches questions : origine de l'inclinaison planétaire et de son champ magnétique, source d'énergie interne, rôle du forçage solaire saisonnier, dynamique de la magnétosphère asymétrique, variations séculaires du champ magnétique, origine du système d'anneaux et de satellites etc.

La communauté SHM possède une large gamme d'instruments bien adaptés qu'il faut soutenir pour participer à la future mission *Flagship* NASA dédiée aux géantes glacées.

c) Météorologie de l'Espace (ME)

Les activités de la communauté SHM en ME évoluent dans un contexte national et international complexe et en évolution rapide sur les plans scientifique, technologique et industriel. Une réponse à ces changements a été la création de l'OFRAME (meteo-espace.fr) qui vise à organiser la communauté scientifique travaillant sur la ME dans le but de répondre de manière visible, efficace et structurée aux sollicitations du monde académique, aux organismes publiques nationaux et internationaux et aux industriels pour lesquels la ME représente aujourd'hui un enjeu technique, scientifique et économique et d'ainsi valoriser au mieux les atouts français, significatifs, dans ce domaine. Dans ce contexte, le soutien des agences, notamment spatiales, est absolument essentiel pour bâtir un système de modélisation et de prévisions des relations Soleil-Terre depuis le Soleil jusqu'à l'ionosphère et la thermosphère.

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 communauté SHM dans un 'contexte opérationnel', notamment au travers du site web de l'OFRAME[1]. Compte-tenu de la sélection récente de la France dans un consortium international fournissant des prévisions en ME pour l'OACI et de l'implication par ce biais de METEO-FRANCE, nous étudierons, avec le soutien de METEO-FRANCE et des entreprises privées impliquées dans ce soutien à l'OACI, de poursuivre le développement d'un centre de ME opérationnel.

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-vswmc.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 SHM/PNST. 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.

Vers des moyens d'observations opérationnels :
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 orages 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 orages solaires de faibles et moyennes amplitudes depuis le Soleil jusqu'à la Terre a déjà été démontrée par les sondes STEREO. **La mission Lagrange en L5 se profile comme une future mission phare du programme ESA-SSA. Le type d'instrumentation envisagé sur cette mission à ce stade n'a pas comme vocation première de contribuer à la recherche fondamentale menée par la communauté SHM mais plutôt à renforcer les aspects applicatifs de notre discipline en réponse aux besoins sociétaux exprimés par les industriels et les instances nationales dans le cadre de la ME.**

Les micro/nano satellites dans l'environnement terrestre proche offrent aussi un potentiel de mesure extrêmement important pour le futur de la ME. Plusieurs études en cours menées par la communauté montrent que des essaims de microsats ou de nanosats déployés dans l'ionosphère (mesure des courants et précipitions de particules) et/ou dans la magnétosphère (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 en ME. Ces technologies nécessitent néanmoins des développements techniques importants, à travers l'étude de nouvelles technologies et la miniaturisation de l'instrumentation embarquée ou le maintien de vols en formation de tels essaims. Les difficultés rencontrées pour la mise en place d'accéléromètres mesurant les mouvements de la thermosphère témoignent des challenges 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 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).

Des développements instrumentaux dédiés à la ME pourraient exploiter les nouvelles technologies spatiales et permettraient de compléter la couverture des mesures des milieux et des interfaces. Nous recommandons donc très fortement une participation au volet 4 du SSA visant à positionner la France sur une participation aux futurs projets spatiaux de l'ESA.

Afin d'exploiter les données existantes et futures pour mieux contraindre nos prévisions en ME, la communauté SHM 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 SHM 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.

En résumé la communauté 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 gestions 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.

3.2 Les nano-satellites

Comme cité à plusieurs reprises dans la prospective du GT SHM, les petites plateformes de type nano-satellites offrent des perspectives nouvelles pour la communauté. La plupart des projets envisagés s'appuyant sur des nano-satellites visent la réalisation de l'un des concepts de mission suivants, concepts difficilement réalisables avec des plateformes plus classiques :

- Concept de mesure multipoints : pour réaliser des mesures in situ simultanément sur des échelles spatiales différentes ou à des positions différentes autour d'un objet, et/ou pour observer simultanément mais suivant plusieurs points de vue ou en réseau, un même objet ou région.
- Concept d'observatoire : pour disposer d'un moniteur en amont d'un objet pour connaître en permanence les conditions solaires,
- Concept d'une mission facilement renouvelable : permettant ainsi de reproduire le même type de mesure sur des échelles de temps bien supérieures à la durée moyenne d'une mission spatiale (bien applicable dans le domaine de la météorologie de l'espace).

On aboutit donc à deux types de mesure, in situ ou à distance. La mesure in situ dans notre thématique implique en premier lieu des contraintes de propreté électromagnétique qui se traduisent soit par des efforts au niveau de la plateforme pour que celle-ci perturbe le moins possible l'environnement immédiat où sont réalisés les mesures in situ du plasma et des champs électromagnétiques, soit par le déploiement de mât pour éloigner la mesure de la plateforme.

Cette deuxième solution implique de développer des technologies relativement nouvelles pour pouvoir implanter des mâts sur de petites plateformes. De plus, la mesure in situ impose aussi souvent d'avoir accès à un champ de vue le plus libre possible ou de maintenir la plateforme en rotation. Ce sont là aussi des contraintes inhabituelles pour les nano-satellites. La mesure à distance en réseau nécessite elle de pouvoir positionner un grand ensemble de plateformes de manière relativement précises les unes par rapport aux autres, donc de développer des systèmes miniaturisés de restitution et de contrôle de la position d'un nano-satellite.

Enfin, utiliser des nano-satellites pour l'exploration spatiale implique aussi de miniaturiser l'instrumentation habituellement utilisée dans notre discipline, ce qui implique souvent de trouver des nouvelles approches innovantes pour réaliser les mesures avec beaucoup moins de ressources (cf. §**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Références

- Alexandrova O., Lacombe C., Matteini L. and M. Maksimovic, Kinetic cascade nature: Cluster and MMS observations in the solar wind and Earth's magnetosheath, Solar Heliospheric and INterplanetary Environment (SHINE 2018), Proceedings of the conference, 2018
- Amari T., Canou A. and J.J. Aly, Characterizing and predicting the magnetic environment leading to solar eruptions, Nature, 514, 465, d oi:10.1038/nature13815, 2014
- Astafyeva E, Lognonné P, and Rolland LM (2011), First ionosphere images for the seismic slip on the example of the Tohoku-oki earthquake. Geophys. Res. Lett., V.38, L22104, doi:10.1029/2011GL049623
- Astafyeva E, Rolland L, Lognonné P, Khelfi K, Yahagi T (2013), Parameters of seismic source as deduced from 1Hz ionospheric GPS data: case-study of the 2011 Tohoku-oki event. J. Geophys. Res. Space Physics, V. 118, N9, 5942-5950, doi:10.1002/jgra50556
- Astafyeva, E, and Shults K (2019), Ionospheric GNSS imagery of seismic source: possibilities, difficulties, challenges. JGR - Space Physics, V.124, N1, doi:10.1029/2018JA026107
- E. Astafyeva, I. Zakharenkova, and M. Foerster. (2015) Ionospheric response to the 2015 St. Patrick's Day storm: a global multi-instrumental overview. *J. Geophys. Res.- Space Physics*, V.120, N10, 9023-9037, doi:10.1002/2015JA021629.
- Astafyeva, E., I. Zakharenkova, K. Hozumi, P. Alken, P. Coisson, M.R. Hairston, and W.R. Coley. (2018) Study of the Equatorial and Low-latitude Electrodynamic and Ionospheric Disturbances during the 22-23 June 2015 Geomagnetic Storm Using Ground-based and Space-borne Techniques. *J. Geophys. Res. - Space Physics*, V.123, N3, 2424-2440, doi:10.1002/2017JA024981
- Appourchaux, T.; Boumier, P.; Leibacher, J. W.; Corbard, T. (2018) Searching for g modes. I. A new calibration of the GOLF instrument Astronomy & Astrophysics, Volume 617, id.A108, 7 pp.
- Auchère, F. Bocchialini, K., Solomon, J, Tison, E. (2014), Long Period Intensity Pulsations in the Solar Corona During Activity Cycle 23, A&A, 563, A8
- Auchère, F., Froment, C., Soubrié, E., Antolin, P., Oliver, R. & Pelouze, G., (2018) The coronal monsoon: thermal nonequilibrium revealed by periodic coronal rain, ApJ, 853, 176
- Banerjee, S.; Hadid, L. Z.; Sahraoui, F.; Galtier, S. (2016) Scaling of Compressible Magnetohydrodynamic Turbulence in the Fast Solar Wind, The Astrophysical Journal Letters, Volume 829, Issue 2, article id. L27, 5 pp.
- Behar, Nilsson, Henri et al., The root of a comet tail: Rosetta ion observations at comet 67P/Churyumov–Gerasimenko, A&A, 616, A21 (2018).
- Béghin, C. (2014), The atypical generation mechanism of Titan's Schumann resonance, J. Geophys. Res. Planets, 119, 520–531, doi:10.1002/2013JE004569
- Bezdeková B, Nemec F, Parrot M, Santolík O, and Kruparova O (2015), Magnetospheric line radiation: 6.5 years of observations by the DEMETER spacecraft, J. Geophys. Res. Space Physics, 120, 9442–9456, doi:10.1002/2015JA021246
- Błęcki J, Parrot M, Słomiński J, Kościesza M, Wronowski R, and Savin S (2016), Evolution of the Ionospheric Plasma Turbulence over Seismic and Thunderstorm Areas, Journal of Environmental Science and Engineering, A6, 277-285, doi:10.17265/2162-5298/2016.06.001
- Boudjada MY, Biagi PF, Al-Haddad E, Galopeau PHM, Besser B, Wolbang D, Prattes G, Eichelberger H, Stangl G, Parrot M, and Schwingenschuh K (2017), Reception conditions of low frequency (LF) transmitter signals onboard DEMETER micro-satellite, Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, Volume 102, Pages 70-79, 2017. https://doi.org/10.1016/j.pce.2016.07.006
- Bourriez F, Sauvaud J.-A, Pinçon J.-L, Berthelier J.-J, and Parrot M (2016), A statistical study over Europe of the relative locations of lightning and associated energetic burst of electrons from the radiation belt, Ann. Geophys., 34, 157-164, doi:10.5194/angeo-34-157-2016
- Briand C., Henri P., Hoang S. (2014) Inhibition of type III radio emissions due to the interaction between two electron beams : observations and simulations, JGR, DOI:10.1029.
- Briand C., (2016), STEREO database of interplanetary Langmuir electric waveforms, Journal of Geophysical Research: Space Physics, Volume 121, Issue 2, pp. 1062-1070.
- Celestin S, Xu W, and Pasko VP, 2015, Variability in fluence and spectrum of high-energy photon bursts produced by lightning leaders, J. Geophys. Res., 120, 10712.
- Cramer ES, Mailyan BG, Celestin S, and Dwyer JR, 2017, A Simulation Study on the Electric Field Spectral Dependence of Thunderstorm Ground Enhancements and Gamma-ray Glows, J. Geophys. Res., 122, 4763.
- Deca J, Divin A, Henri P, Eriksson A, Markidis S, Olshevsky V, and Horányi M (2017), Electron and Ion Dynamics of the Solar Wind Interaction with a Weakly Outgassing Comet, Phys. Rev. Lett., 118, 205101

- De Santis A, De Franceschi G, Spogli L, Perrone L, Alfonsi L, Qamili E, Cianchini G, Di Giovambattista R, Salvi S, Filippi E, Pavon-Carrasco FJ, Monna S, Piscini A, Battiston R, Vitale V, Picozza PG, Conti L, Parrot M, Pincon J.-L, Balasis G, Tavani M, Argan A, Piano G, Rainone ML, Liu W, Tao D (2015), Geospace perturbations induced by the Earth: the state of the art and future trends. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, V. 85-86, Pages 17–33.
- Dudok de Wit T., Bruinsma S. and K. Shibasaki, Synoptic radio observations as proxies for upper atmosphere modelling, J. Space Weather and Space Climate, 4, 13, 2014
- Dudok de Wit T. and Bruinsma, The 30 cm radio flux as a solar proxy for thermosphere density modelling, J. Space Weather and Space Climate, 7, 11, 2017
- Fossat, E., Boumier, P., Corbard, T., Provost, J., Salabert, D., Schmider, F. X., Gabriel, A. H., Grec, G., Renaud, C., Robillot, J. M., Roca-Cortés, T., Turck-Chièze, S., Ulrich, R. K., Lazrek, M (2017), Asymptotic g modes: Evidence for a rapid rotation of the solar core, Astronomy & Astrophysics, Volume 604, id.A40, 17 pp.
- Fossat, E., et Schmider, F. X. (2018) More about solar g modes, Astronomy & Astrophysics, Volume 612, id.L1, 5 pp.
- Frolov VL, Rapoport VO, Shorokhova EA, Aidakina NA, Gushchin ME, Zudin IY, Korobkov SV, Kostrov AV, Parrot M, and Rauch, JL (2015), Fine structure of density ducts formed by active radiofrequency action on laboratory and space plasmas, JETP Letters, 101(5), 313-317
- Frolov VL, Rapoport VO, Schorokhova EA, Belov AS, Parrot M, and Rauch JL (2016), Features of the Electromagnetic and Plasma Disturbances Induced at the Altitudes of the Earth's Outer Ionosphere by Modification of the Ionospheric F2 Region Using High-Power Radio Waves Radiated by the SURA Heating Facility, Radiophysics and Quantum Electronics, 59(3), 177-198Froment, C., Auchère, F., Bocchialini, K. Buchlin, E., Guennou, C., Solomon, J. (2015), Evidence for evaporation-incomplete condensation cycles in warm solar coronal loops, ApJ, 807, 158
- Froment, C., Auchère, F. Aulanier, G., Mikic, Z., Bochialini, K., Buchlin, E., & Solomon, J., Soubrié, E. (2018), On the Occurrence of Thermal Nonequilibrium in Coronal Loops, ApJ, 855, 52
- Fu, H. S., A. Vaivads, Y. V. Khotyaintsev, M. André, J. B. Cao, V. Olshevsky, J. P. Eastwood, and A. Retinò (2017), Intermittent energy dissipation by turbulent reconnection, Geophys. Res. Lett., 44, 37–43, doi:10.1002/2016GL071787.
- Giono, G., Ishikawa, R., Narukage, N., Kano, R., Katsukawa, Y., Kubo, M., Ishikawa, S., Bando, T., Hara, H., Suematsu, Y., Winebarger, A., Kobayashi, K., Auchère, F., Trujillo Bueno, J., Tsuneta, S., Shimizu, T., Sakao, T., Cirtain, J., Champey, P., Asensio Ramos, A., Štěpán, J., Belluzzi, L., Manso Sainz, R., De Pontieu, B., Ichimoto, K., Carlsson, M., Casini, R., Goto, M. (2017), Polarization calibration of the Chromospheric Lyman-Alpha SpectroPolarimeter for a 0.1% polarization sensitivity in the VUV range. Part II :In-flight calibration, Sol. Phys., 292(4), 57
- Hadid, L. Z. and Sahraoui, F. and Galtier, S. and Huang, S. Y. (2018), Compressible Magnetohydrodynamic Turbulence in the Earth's Magnetosheath: Estimation of the Energy Cascade Rate Using in situ Spacecraft Data, Phys. Rev. Lett. 120, 055102.
- Hajra, Henri, Vallières, Moré, Gilet, Wattieaux, Goetz, Richter, Tsurutani, Gunell, Nilsson, Eriksson, Nemeth, Burch, Rubin, Dynamic unmagnetized plasma in the diamagnetic cavity around comet 67P/Churyumov-Gerasimenko, MNRAS, 475, 4140 (2018)
- Henri, Myllys, et al., Cometary plasma response to interplanetary corotating interaction regions during 2016 June-September: a quantitative study by the Rosetta Plasma Consortium, Mon. Not. R. Astron. Soc., 480, 4544 (2018)
- Heritier, Altwegg, Berthelier, Beth, Carr, De Keyser, Eriksson, Fuselier, Galand, Gombosi, Henri, Johansson, Nilsson, Rubin, Simon Wedlund, Taylor, Vigren, On the origin of molecular oxygen in cometary comae, Nature Communications, 9, 2580 (2018)
- Heritier, Galand, Henri et al., Plasma source and loss at comet 67P during the Rosetta mission, A&A, 618, A77 (2018)
- Huang, Sahraoui et al., Magnetospheric Multiscale Observations of Electron Vortex Magnetic Hole in the Turbulent Magnetosheath Plasma 836:L27 (8pp), 2017
- Hung, C.P., Brun, A.S., Fournier, A., Jouve, L., Talagrand, O., Zakari, M. 2017. Variational Estimation of the Large-scale Time-dependent Meridional Circulation in the Sun: Proofs of Concept with a Solar Mean Field Dynamo Model. The Astrophysical Journal 849, 160, 2017.

- Hung, C.P., Jouve, L., Brun, A.S., Fournier, A., Talagrand, O., 2015. Estimating the Deep Solar Meridional Circulation Using Magnetic Observations and a Dynamo Model: A Variational Approach. The Astrophysical Journal 814, 151, 2015.
- Ishikawa, R., Trujillo Bueno, J., Uitenbroek, H., Kubo, M., Tsuneta, S., Goto, M., Kano, R., Narukage, N., Bando, T., Katsukawa, Y., Ishikawa, S., Giono, G., Suematsu, Y., Hara, H., Shimizu, T., Sakao, T., Winebarger, A., Kobayashi, K., Cirtain, J., Champey, P., Auchère, F., Štěpán, J., Belluzzi, L., Asensio Ramos, A., Manso Sainz, R., De Pontieu, B., Ichimoto, K., Carlsson, M., Casini, R. (2017), Indication of the Hanle Effect by Comparing the Scattering Polarization Observed by CLASP in the Lyα and Si iii 120.65 nm Lines, ApJ, 841, 31
- Jakosky et al., (2018), Loss of the Martian atmosphere to space: Present-day loss rates determined from MAVEN observations and integrated loss through time, Icarus, 315, 146–157.
- Kacem et al., Magnetic Reconnection at a Thin Current Sheet Separating Two Interlaced Flux Tubes at the Earth's Magnetopause, , J. Geophys. Res., 123, 1779, 2018
- Kamogawa et al. (2016) A possible space-based tsunami early warning system using observations of the tsunami ionospheric hole. Sci. Rep., 6:37989, doi:10.1038/srep37989.
- Kano, R., Trujillo Bueno, J., Winebarger, A., Auchère, F., Narukage, N., Ishikawa, R., Kobayashi, K., Bando, T., Katsukawa, Y., Kubo, M., Ishikawa, S., Giono, G., Hara, H., Suematsu, Y., Shimizu, T., Sakao, T., Tsuneta, S., Ichimoto, K., Goto, M., Belluzzi, L., Štěpán, J., Asensio Ramos, A., Manso Sainz, R., Champey, P., Cirtain, J., De Pontieu, B., Casini, R., Carlsson, M. (2017), Discovery of Scattering Polarization in the Hydrogen Lyman-α Line of the Solar Disk Radiation, APjL, 939(1), L10
- Kobayashi, S., Sahraoui, F., Passot, T., Laveder, D., Sulem, P. L., Huang, S. Y., Henri, P., Smets, R. (2017) Three-dimensional Simulations and Spacecraft Observations of Sub-ion Scale Turbulence in the Solar Wind: Influence of Landau Damping, The Astrophysical Journal, Volume 839, Issue 2, article id. 122, 11 pp.
- Krupar V., M. Maksimovic, O. Santolik, E. P. Kontar, B. Cecconi, S. Hoang, O. Kruparova, J. Soucek, H. Reid, and A. Zaslavsky, Sol. Phys., 289, 8, 3121-3135, 2014.
- Kubo, M., Katsukawa, Y., Suematsu, Y., Kano, R., Bando, T., Narukage, N., Ishikawa, R., Hara, H., Giono, G., Tsuneta, S., Ishikawa, S., Shimizu, T., Sakao, T., Winebarger, A., Kobayashi, K., Cirtain, J., Champey, P., Auchère, F., Trujillo Bueno, J., Asensio Ramos, A., Štěpán, J., Belluzzi, L., Manso Sainz, R., De Pontieu, B., Ichimoto, K., Carlsson, M., Casini, R., Goto, M. (2016), Discovery of Ubiquitous Fast-Propagating Intensity Disturbances by the Chromospheric Lyman Alpha Spectropolarimeter (CLASP), ApJ, 832, 141
- Lacombe, Catherine; Alexandrova, Olga; Matteini, Lorenzo (2017) Anisotropies of the Magnetic Field Fluctuations at Kinetic Scales in the Solar Wind: Cluster Observations, The Astrophysical Journal, Volume 848, Issue 1, article id. 45, 13 pp.
- Lamy L., P. Zarka, B. Cecconi, R. Prangé, W. S. Kurth, G. Hospodarsky, A. Persoon, M. Morooka, J.-E. Wahlund, G. J. Hunt (2018), The low frequency source of Saturn's Kilometric Radiation, Science, 362, eaat2027, doi:10.1126/science.aat2027.
- Lavraud et al., Currents and associated electron scattering and bouncing near the diffusion region at Earth's magnetopause, Geophys. Res. Let., 43, 3042, 2016.
- Le Chat G., K. Issautier, A. Zaslavsky, F. Pantellini, N. Meyer-Vernet, S. Belheouane, M. Maksimovic, Solar Phys, DOI 10.1007/s11207-015-0651, (2015)
- Lee, S. H., H. Zhang, Q.-G. Zong, A. Otto, H. Rème, and E. Liebert (2016), A statistical study of plasmaspheric plumes and ionospheric outflows observed at the dayside magnetopause, J. Geophys. Res. Space Physics, 121, 492–506, doi:10.1002/2015JA021540
- Lion, Sonny, Alexandrova, Olga, Zaslavsky, Arnaud (2016)Coherent Events and Spectral Shape at Ion Kinetic Scales in the Fast Solar Wind Turbulence, The Astrophysical Journal, Volume 824, Issue 1, article id. 47, 13 pp.
- Louarn et al., Generation of the Jovian hectometric radiation: First lessons from Juno, Geophys. Res. Let., 44, 4439, 2017
- Louarn et al., Observation of Electron Conics by Juno: Implications for Radio Generation and Acceleration Processes, Geophys. Res. Let., 45, 9408, 2018
- Louis, C.K., Lamy, L., Zarka, P., Cecconi, B., Hess, S.L.G. (2017a), Detection of Jupiter decametric emissions controlled by Europa and Ganymede with Voyager/PRA and Cassini/RPWS, J. Geophys. Res., 122, 9, 9228-9247, doi: 10.1002/2016JA023779
- Louis, C.K., Lamy, L., Zarka, P., Cecconi, Imai, M., Kurth, W.S., Hospodarsky, G., Hess, S.L.G., Bonnin, X., Bolton, S., Connerney, J.E.P., Levin, S.M. (2017b), Io-Jupiter decametric arcs observed by Juno/Waves compared to ExPRES simulations, Geophys. Res. Let., 44, 18, 9225-9232, 10.1002/2017GL073036
- Malaspina, D., M. Horanyi, A. Zaslavsky, K. Goetz, L. Wilson III, K. Kersten (2014), Interplanetary and interstellar dust observed by the Wind/Waves electric field instrument, Geophys. Res. Lett., 41, 266-272

- Marchaudon et Blelly, A new interhemispheric 16-moment model of the plasmasphere-ionosphere system: IPIM, J. Geophys. Res. Space Physics, 120, 5728, 2015
- Marchaudon A., Blelly P.-L., Grandin M., Aikio A., Kozlovsky A. and Virtanen I., IPIM Modeling of the Ionospheric F_2 Layer Depletion at High Latitudes During a High-Speed Stream Event, 123, 7051, 2018
- Martinović, M. M., A. Zaslavsky, M. Maksimović, N. Meyer-Vernet, S. Šegan, I. Zouganelis, C. Salem, M. Pulupa, and S. D. Bale (2016), Quasi-thermal noise measurements on STEREO: Kinetic temperature deduction using electron shot noise model, J. Geophys. Res. Space Physics, 121, 129–139, doi:10.1002/2015JA021710.
- Martinez A., Leblanc F., Chaufray J.Y., Modolo R., Romanelli N., Curry S., Luhmann J., Lillis R., Hara T., McFadden J., Halekas J., Eparvier F., Larson D., J. Connerney, Y. Ma, M. Holmström, Witasse O. and B. Jakosky, Variability of the ion precipitating fluxes during September 2017 event, J. Geophys. Res., Submitted, 2018.
- Matteini, L., Horbury, T. S., Neugebauer, M., Goldstein, B. E. (2014) Dependence of solar wind speed on the local magnetic field orientation: Role of Alfvénic fluctuations, Geophysical Research Letters, Volume 41, Issue 2, pp. 259-265
- Matteini, L., Horbury, T. S., Pantellini, F., Velli, M., Schwartz, S. J. (2015) Ion Kinetic Energy Conservation and Magnetic Field Strength Constancy in Multi-fluid Solar Wind Alfvénic Turbulence, The Astrophysical Journal, Volume 802, Issue 1, article id. 11, 6 pp.
- Meftah, M., Damé, L., Bolsée, D., Pereira, N., Sluse, D., Cessateur, G., Irbah, A., Sarkissian, A., Djafer, D., Hauchecorne, A., Bekki, S. (2017) A New Solar Spectrum from 656 to 3088 nm, Solar Physics, Volume 292, Issue 8, article id.101, 21 pp.
- Meftah, M., Damé, L., Bolsée, D., Hauchecorne, A., Pereira, N., Sluse, D., Cessateur, G., Irbah, A., Bureau, J., Weber, M., Bramstedt, K., Hilbig, T., Thiéblemont, R., Marchand, M., Lefèvre, F., Sarkissian, A., Bekki, S. (2018a) SOLAR-ISS: A new reference spectrum based on SOLAR/SOLSPEC observations, Astronomy & Astrophysics, Volume 611, id.A1, 14 pp.
- Meftah, M., Corbard, T., Hauchecorne, A., Morand, F., Ikhlef, R., Chauvineau, B., Renaud, C., Sarkissian, A., Damé, L. (2018b) Solar radius determined from PICARD/SODISM observations and extremely weak wavelength dependence in the visible and the near-infrared, Astronomy & Astrophysics, Volume 616, id.A64, 10 pp Meyer-Vernet N., Mann I., Le Chat, G., Schippers, P., Belheouane, S., Issautier, K., Lecacheux, A., Maksimovic, M., Pantellini, F., Zaslavsky, A. (2015), The physics and detection of nanodust in the solar system, Plasma Physics & Controlled Fusion, 57, 014015, doi:10.1088/0741-3335/57/1/014015
- Musset, S.; Vilmer, N.; Bommier, V. Hard X-ray emitting energetic electrons and photospheric electric currents Astronomy & Astrophysics, Volume 580, id.A106, 2015
- Musset,S. ; Kontar, E.P., Vilmer, N. : Diffusive Transport of Energetic Electrons in the Solar Corona : X-ray and Radio Diagnostics, Astronomy & Astrophysics, Volume Volume 610, id.A6, 2018.
- Montagud-Camps, V., Grappin, R., Verdini, A. (2018) Turbulent Heating between 0.2 and 1 au: A Numerical Study, The Astrophysical Journal, Volume 853, Issue 2, article id. 153, 10 pp.
- Narukage, N. et al. dont Auchère, F. (2017), High reflectivity coatings for vacuum ultraviolet spectro-polarimeter, Solar Physics, 292(3), 40
- Němec F, Parrot M, and Santolík O (2015), Power line harmonic radiation observed by the DEMETER spacecraft at 50/60 Hz and low harmonics, J. Geophys. Res. Space Physics, 120, doi:10.1002/2015JA021682
- Němec F, Cížek K, Parrot M, Santolik O, and Zahlava J (2017), Line radiation events induced by very low frequency transmitters observed by the DEMETER spacecraft, J. Geophys. Res. Space Physics, 122, 7226-7239, doi:10.1002/2017JA024007
- Occhipinti, G. (2015) *The Seismology of the Planet Mongo: The 2015 Ionospheric Seismology Review* , AGU Books, Subduction Dynamics: From Mantle to Mega Disasters, Editors: G. Morra, D. A. Yuen, S. King, S. M. Lee, S. Stein, ISBN 978-1-118-88885-8.
- Parrot M, Němec F, and Santolík O (2014), Statistical analysis of VLF radio emissions triggered by power line harmonic radiation and observed by the low-altitude satellite DEMETER, J. Geophys. Res. Space Physics, 119, doi:10.1002/2014JA020139.
- Parrot M, Berthelier J.-J, Blecki J, Brochot JY, Hobara Y, Lagoutte D, Lebreton JP, Němec F, Onishi T, Pinçon J.-L, Píša D, Santolík D, Sauvaud J.-A, Slominska E (2015), Unexpected Very Low Frequency (VLF) Radio Events Recorded by the Ionospheric Satellite DEMETER, Surveys in Geophysics, 36(3), 483-511
- Passot T., P.L Sulem, E. Tassi, Electron-scale reduced fluid models with gyroviscous effects, Electron-scale reduced fluid models with gyroviscous effects, Journal of Plasma Physics, vol. 83, no. 04, 2017
- Perrone, D., Alexandrova, O., Mangeney, A., Maksimovic, M., Lacombe, C., Rakoto, V., Kasper, J. C., Jovanovic, D. (2016) Compressive Coherent Structures at Ion Scales in the Slow Solar Wind, The Astrophysical Journal, Volume 826, Issue 2, article id. 196, 19 pp.

- Perrone, D., Alexandrova, O., Roberts, O. W., Lion, S., Lacombe, C., Walsh, A., Maksimovic, M., Zouganelis, I. (2017) Coherent Structures at Ion Scales in Fast Solar Wind: Cluster Observations, The Astrophysical Journal, Volume 849, Issue 1, article id. 49, 16 pp.
- Phan et al. Electron magnetic reconnection without ion coupling in Earth's turbulent magnetosheath, Nature, 577, 202, 2018
- Pinto, R. F.; Vilmer, N.; Brun, A. S. Soft X-ray emission in kink-unstable coronal loops Astronomy & Astrophysics, Volume 576, id.A37, 2015.
- Pinto, R.; Gordovskyy, M.; Browning, P. K.; Vilmer, N. Thermal and non-thermal emission from reconnecting twisted coronal loops Astronomy & Astrophysics,Volume 585, id.A159, 2016
- Pinto, R. F., and Rouillard, A. P. (2017) A Multiple Flux-tube Solar Wind Model, The Astrophysical Journal, Volume 838, Issue 2, article id. 89, 15 pp.
- Pitout F, Marchaudon A, Blelly P-L, Bai X, Forme F, Buchert SC, Lorentzen DA (2015), Swarm and ESR observations of the ionospheric response to a field-aligned current system in the high-latitude midnight sector, Geophysical Research Letters, 42, pp. 4270-4279, DOI: 10.1002/2015GL064231
- Plotnikov, I., Rouillard, A.P., Share, G., The magnetic connectivity of coronal shocks from behind the limb flares to the visible solar surface during gamma-ray events Astronomy & Astrophysics, Volume 608, id.A43, 20
- Rahmati, A., et al. (2017), MAVEN measured oxygen and hydrogen pickup ions: Probing the Martian exosphere and neutral escape, J. Geophys. Res. Space Physics, 122, 3689–3706, doi:10.1002/2016JA023371.
- Ramstad R, Barabash S, Futaana Y, Nilsson H, Holmstrom M. (2017), Global Mars-solar wind coupling and ion escape, Journal of Geophysical Research-Space Physics, 122(8):8051-8062.
- Ramstad R, Barabash S, Futaana Y, Nilsson H, Wang XD, Holmstrom M. (2015), The Martian atmospheric ion escape rate dependence on solar wind and solar EUV conditions: 1. Seven years of Mars Express observations, Journal of Geophysical Research-Planets, 120(7):1298-1309.
- Romanelli, N. and al. (2018). Responses of the Martian magnetosphere to an interplanetary coronal mass ejection: MAVEN observations and LatHyS results: RESPONSE OF MARS TO A CME. Geophysical Research Letters. 10.1029/2018GL077714.
- Rouillard, A. P., Plotnikov, I., Pinto, R. F., Tirole, M., Lavarra, M., Zucca, P., Vainio, R., Tylka, A. J., Vourlidas, A., De Rosa, M. L., Linker, J., Warmuth, A., Mann, G., Cohen, C. M. S., Mewaldt, R. A. (2016) Deriving the Properties of Coronal Pressure Fronts in 3D: Application to the 2012 May 17 Ground Level Enhancement, The Astrophysical Journal, Volume 833, Issue 1, article id. 45, 23 pp.
- Rouillard, A. P., Lavraud, B., Génot, V., Bouchemit, M., Dufourg, N., Plotnikov, I., Pinto, R. F., Sanchez-Diaz, E., Lavarra, M., Penou, M., Jacquey, C., André, N., Caussarieu, S., Toniutti, J.-P., Popescu, D., Buchlin, E., Caminade, S., Alingery, P., Davies, J. A., Odstrcil, D., Mays, L. (2017) A propagation tool to connect remote-sensing observations with in-situ measurements of heliospheric structures, Planetary and Space Science, Volume 147, p. 61-77.
- Rouillard, A.P., Models and Data Analysis Tools for the Solar Orbiter mission, submitted to Astronomy and Astrophysics, 2019
- Roussos et al., A radiation belt of energetic protons located between Saturn and its rings, Science, 362, 6410, 2018
- Savastano G. et al. (2017) Real-time detection of tsunami ionospheric disturbances with a stand-alone GNSS-Receiver: A preliminary Feasibility Demonstration. Sci. Rep., 7:46607, doi:10.1038/srep46607. Schippers P., Meyer-Vernet N., Lecacheux, A., Belheouane, S., Moncuquet, M., Mann, I., Kurth W. S., Mitchell D. G., André, N. (2015) Nanodust detection between 1 and 5 AU by using Cassini wave measurements, Astrophys. J 806:77, doi:10.1088/0004-637X/806/1/77.
- Schmit, D., Sukhorukov, A. V., De Pontieu, B., Leenaarts, J., Bethge, C., Winebarger, A., Auchère, F., Bando, T., Ishikawa, R., Kano, R., Kobayashi, K., Narukage, N., Trujillo Bueno, J. (2018) Comparison of Solar Fine Structure Observed Simultaneously in Lyα and Mg ii h, ApJ, 847, 141
- Schunker, H., Schou, J., Gaulme, P., Gizon, L. (2018) Fragile Detection of Solar g-Modes by Fossat et al. Solar Physics, Volume 293, Issue 6, article id. 95, 12 pp.
- Shults K., E. Astafyeva and S. Adourian (2016). Ionospheric detection and localization of volcano eruptions on the example of the April 2015 Calbuco events. *J. Geophys. Res. -Space Physics*, V.121, N10, pp. 10,303-10,315, doi:10.1002/2016JA023382.
- Strugarek, A., Beaudoin, P., Charbonneau, P., Brun, A. S., do Nascimento, J.-D. (2017) Reconciling solar and stellar magnetic cycles with nonlinear dynamo simulations, Science, Volume 357, Issue 6347, pp. 185-187
- Trujilo Bueno, J. Štěpán, J., Belluzzi, L., Asensio Ramos, A., Manso Sainz, R., del Pino Alemán, T., Casini, R., Ishikawa, R., Kano, R., Winebarger, A., Auchère, F., Narukage, N., Kobayashi, K., Bando, T., Katsukawa, Y., Kubo,

M., Ishikawa, S., Giono, G., Hara, H., Suematsu, Y., Shimizu, T., Sakao, T., Tsuneta, S.; Ichimoto, K.; Cirtain, J.; Champey, P.; De Pontieu, B.; Carlsson, M. (2018), CLASP Constraints on the Magnetization and Geometrical Complexity of the Chromosphere-Corona Transition Region, ApJL, 866(1), L15

- Titova EE, Demekhov AG, Mochalov AA, Gvozdevsky BB, Mogilevsky MM, and Parrot M (2015), ELF/VLF Perturbations Above the Haarp Transmitter Recorded by the Demeter Satellite in the Upper Ionosphere. Radiophysics and Quantum Electronics, 58(3), 155-172.
- Vartanyan A, Milikh GM, Eliasson B, Najmi AC, Parrot M, and Papadopoulos K (2016), Generation of whistler waves by continuous HF heating of the upper ionosphere, Radio Sci., 51, 1188–1198, doi:10.1002/2015RS005892
- Vernisse et al., Signatures of complex magnetic topologies from multiple reconnection sites induced by Kelvin-Helmholtz instability, J. Geophys. Res., 121, 9926, 2016
- Xu W, Celestin S, Pasko VP, and Marshall RA, 2017, A novel type of transient luminous event produced by terrestrial Gamma-ray flashes, Geophys. Res. Lett., 44, 2571.
- Yaya P., Hecker L., Dudok De Wit T., Fèvre C. and S. Bruinsma, Solar radio proxies for improved satellite orbit prediction, J. Space Weather and Space Climate, 7, 17, 2017
- Zhang et al., First in situ evidence of electron pitch angle scattering due to magnetic field line curvature in the Ion diffusion region, J. Geophys. Res., 121, 4103, 2016.
- Zhang et al., Quantitative analysis of a Hall system in the exhaust of asymmetric magnetic reconnection, J. Geophys. Res., 122, 5277, 2017.