

GROUPE THEMATIQUE SOLEIL HÉLIOSPHERE MAGNÉTOSPHÈRES (SHM) DU CNES

Membres du GT SHM : Amsif Kader (thématicien), Astafyeva Elvira, Auchère Frédéric, Baudin Frédéric, Berthomier Matthieu, Célestin Sébastien, Génot Vincent, Hadid Lina, Issautier Karine, Koutroumpa Dimitra, Kretzschmar Matthieu (président), Maget Vincent, Strugarek Antoine

INTRODUCTION

La thématique Soleil Héliosphère Magnétosphères SHM traite principalement des **milieux ionisés du système solaire**. Ceux-ci, dans leur variété, sont présents dans notre étoile, dans le milieu interplanétaire, dans les magnétosphères et ionosphères des planètes, dont la Terre, et jusque dans les régions d'interface entre la basse atmosphère et l'ionosphère. L'ensemble de ces milieux représente un **large spectre de plasmas aux propriétés différentes** et qui ne sont pas, ou très peu, reproductibles en laboratoire. La proximité de ces objets permet leur observation à **très haute résolution spatiale et temporelle**, comme dans le cas du Soleil, et même de **les explorer in situ**. On peut ainsi observer et étudier en détail des phénomènes physiques universels et à l'œuvre dans de nombreux autres plasmas astrophysiques, comme **la reconnexion magnétique, les chocs, la turbulence, l'accélération et le chauffage des particules et l'émission de rayonnement électromagnétique**.

Les recherches dans la thématique SHM s'organisent autour de deux grandes questions :

Comment le Soleil fonctionne et contrôle l'héliosphère ?

Le Soleil est la seule étoile qui peut être étudiée dans toute sa complexité. Il s'agit de comprendre comment l'énergie est transportée de son intérieur jusque dans le milieu interplanétaire, et notamment comment l'activité magnétique solaire est initiée puis transformée en énergie pour le chauffage de l'atmosphère solaire, l'accélération et la cascade turbulente du vent solaire, et la génération des événements éruptifs qui sculptent l'héliosphère et impactent les planètes.

Comment se créent et varient les environnements terrestre et planétaires ?

Il s'agit de comprendre comment les propriétés des planètes et notamment de la Terre vont influencer la structure des environnements ionisés, magnétosphères et ionosphères. La très forte dynamique de ces environnements, illustrée notamment lors des orages magnétiques donnant lieu aux aurores boréales et australes, fait intervenir des processus complexes impliquant différentes échelles spatiales et temporelles qui ne sont encore que partiellement compris.

Ces deux grandes questions sont abordées de façon unifiée dans le cadre de la météorologie de l'espace, qui vise à décrire, comprendre, puis prévoir quand l'activité solaire peut affecter nos activités technologiques.

1. BILAN ET AVANCEES DEPUIS LA PROSPECTIVE 2019

1.1. BILAN PROGRAMMATIQUE

Voici le résumé des priorités du GT SHM en 2019 :

Thème scientifique	Type de mesure/d'observables	Cadre de réalisation ⁽¹⁾	R&T associée
<i>Résoudre la dissipation aux plus petites échelles turbulentes dans le vent solaire proche, l'accélération des particules dans la magnétosphère terrestre, la reconnexion magnétique et la physique du choc magnétosphérique</i>	Observations simultanées des échelles fluide, ionique et électronique	ESA, NASA, JAXA	
<i>Comprendre le magnétisme coronal et la dynamique de l'atmosphère solaire</i>	Observations spectroscopiques et polarimétriques à haute résolution du Soleil	ESA, NASA (SOLARIS), JAXA (Solar-C)	
<i>Développer un prototype de nano-satellite adapté à la caractérisation des plasmas spatiaux</i>	Exploration in situ des plasma spatiaux à partir de nano-satellites	CNES	Etudes PASO nano-satellite et miniaturisation de l'instrumentation plasma
<i>Comprendre la dynamique des environnements planétaires et cométaires</i>	Mesure multi-points dans les magnétosphères planétaires	ESA (Comet Interceptor), JAXA, NASA (RENSEM)	
<i>Sonder l'ionosphère de manière systématique à l'aide de concepts de plateformes nano-satellite à vocation météorologie de l'espace</i>	Mesure in-situ multi-points de l'ionosphère	ESA (CIRCUS, NUAM)	
<i>Comprendre la dynamique des magnétosphères des géantes glacées</i>	Explorer les magnétosphères des géantes glacées	ESA, NASA (M*)	
<i>Comprendre la structure interne du Soleil</i>	Observation sismique	ESA, NASA	

Certaines priorités ont bénéficié d'avancées majeures sans être pleinement encore réalisées :

- La mission **Comet-Interceptor** (lancement 2027) a été sélectionnée par l'Esa (classe F) pour aller explorer une comète primitive et le CNES s'est engagé sur la contribution française pour les phases de développement BCDE1 ;
- La mission de la Jaxa **Solar-C** (lancement 2028) pour étudier la dynamique de l'atmosphère solaire à très haute résolution doit passer en phase B en septembre 2024 à la Jaxa, et la définition et la participation de la France à la réalisation du spectrographe EUV, principal instrument de la mission, est maintenant consolidée (voir section 2);
- La mission **HelioSwarm** a été sélectionnée par la Nasa pour un lancement en 2029 avec pour objectifs les premières mesures multi-échelles (fluides et ioniques) simultanées dans le vent solaire grâce à une constellation de neuf satellites. La France est sollicitée pour y contribuer fortement en fournissant deux des quatre instruments (voir section 2);
- L'étude Paso du nano satellite **Speed** optimisé pour la mesure des plasmas spatiaux a permis de préciser les besoins et les étapes à entreprendre afin de le réaliser et a généré une forte activité de R&T ;
- Une mission dédiée à l'exploration d'Uranus a été inscrite dans le Decadal Survey de planétologie et astrobiologie 2022 de la Nasa (voir section 2).

1.2. PHYSIQUE DU SOLEIL ET DE L'HELIOSPHERE

La compréhension de notre environnement spatial passe nécessairement par l'étude du Soleil, principal acteur de la variabilité observée et seule étoile que l'on peut étudier en détail. Ce domaine de recherche a été marqué par le lancement de deux missions majeures, **Solar Orbiter** (Esa, 2020) et **Parker Solar Probe** (Nasa, 2018). Elles s'ajoutent aux observatoires solaires historiques toujours en activité (e.g. **Soho**, **SDO**, **Stereo**). Si la forte participation de la communauté française à **Solar Orbiter (SOLO)** était attendue, la France est le seul pays hors Etats-Unis à avoir fourni un instrument à **Parker Solar Probe (PSP)**. Les bases de données **Medoc** et **CDPP** et les différents services **d'observations** assurés par la communauté jouent un rôle essentiel dans l'exploitation de ces missions en fournissant un accès centralisé aux données.

Une des découvertes majeures de **PSP**, qui s'est aventurée plus près du Soleil que n'importe quelle autre sonde, est l'omniprésence de structures possédant un champ magnétique retourné dans le vent solaire jeune, appelées *Switchbacks*. La communauté française s'est fortement impliquée dans leur caractérisation et leur interaction avec le vent solaire ambiant. Il semble maintenant admis qu'elles sont la signature dans le vent solaire de reconnexions magnétiques liées à la supergranulation dans l'atmosphère solaire, et qu'elles donnent lieu à des micros faisceaux de vent solaire rapide.

SOLO a débuté sa phase nominale fin 2021 avec à la fois des mesures *in situ* couvrant les distances $0.3 \text{ UA}^1 - 1 \text{ UA}$ et des observations inédites du Soleil au périhélie, qui ont permis une exploration de l'héliosphère interne de manière approfondie. Par exemple, les mesures *in situ* ont permis de répertorier et caractériser les ondes présentes dans le vent solaire en fonction de la distance au Soleil (Fig. 1). L'effet global des ondes de sifflement (*whistlers*) sur les électrons peut expliquer pourquoi les électrons les plus énergétiques du vent solaire perdent leur alignement strict avec le champ magnétique au cours de leur propagation, ce qui était incompris depuis des décennies. Le vent solaire a pu être caractérisé depuis quasiment sa zone de naissance jusqu'à 1 UA , ce qui impose des contraintes fortes sur les modèles mais pose également de nouvelles questions.

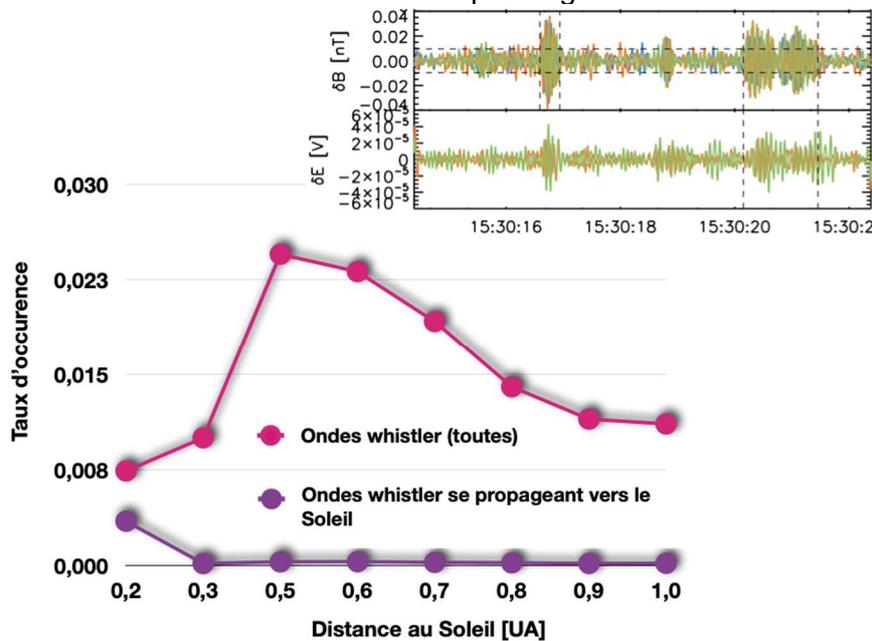


Fig.1. Taux d'apparition des ondes Whistler (exemple dans l'insert en haut à droite) dans le vent solaire, mesuré par **SOLO/RPW** et **PSP**. Adapté de Colomban et al. (2024).

La combinaison des observations de ces nouvelles missions avec celles des observatoires sol (instruments radio de la station de Nançay notamment) et des missions plus anciennes comme

¹ UA= 1 unité astronomique vaut la distance Terre-Soleil

Soho a permis d'effectuer des analyses multipoints et multi-longueurs d'onde des événements éruptifs solaires et d'apporter des contraintes fortes sur la génération et la propagation de ces événements.

Les premiers périhélie de **Solo** en dessous de 0.3 UA ont permis d'obtenir des images spectaculaires de la couronne solaire à une résolution spatiale inédite de 100 km par pixel. Elles ont révélé les événements éruptifs les plus localisés jamais observés dans la couronne dans l'extrême ultraviolet (Fig. 2), qui prolongent le spectre des éruptions vers les échelles spatiales les plus petites. Des travaux sont en cours afin de tester l'hypothèse d'Eugene Parker selon laquelle la reconnexion magnétique serait à l'origine des températures de l'ordre du million de degrés des couronnes d'étoiles de type solaire.

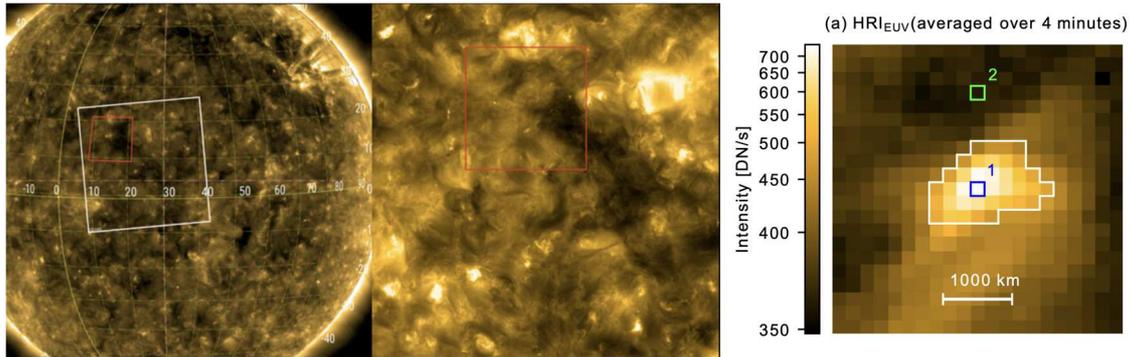


Fig. 2 : « Campfires » observés par **Solo** dans la couronne solaire avec EUV à 17,4 nm [Panneaux de gauche : Berghmans et al., 2021 ; Panneau de droite : Dolliou et al., 2023].

De nombreux efforts de modélisation ont été par ailleurs fournis par la communauté pour l'interprétation des observations, que ce soit pour expliquer l'origine du cycle solaire, pour établir la connectivité magnétique entre le Soleil et les mesures *in situ*, ou pour expliquer la génération et la propagation des éruptions.

1.3. ENVIRONNEMENTS TERRESTRE ET PLANÉTAIRES

L'exploitation des missions planétaires avec implication française s'est poursuivie, avec de nouvelles avancées importantes. La sonde **Juno** (Nasa, 2011) a permis de comprendre le rôle de l'interaction de la planète avec ses lunes dans l'émission du rayonnement radio. Il a également été montré que le champ magnétique de Jupiter possédait une asymétrie nord-sud tandis que celui de Saturne, étudié par la mission **Cassini**, semblait axisymétrique. Un travail important de modélisation a démarré pour la préparation de la phase nominale de la mission **Juice** (Esa, 2023), lancée en 2023 par l'Esa en direction de Jupiter. La mission **Maven** (Nasa, 2013), en orbite autour de Mars, a montré l'existence de variations saisonnières de l'échappement de l'hydrogène atmosphérique plus importantes que prévu. Elle a également permis de mieux comprendre la génération des ondes de choc liées au vent solaire et a mis en évidence la variabilité des zones frontières de l'ionosphère martienne en fonction du vent solaire, du flux ultraviolet et des champs magnétiques crustaux. La mission **BepiColombo** (Esa, 2018), en phase de croisière vers Mercure, a livré de beaux résultats lors des premiers survols de Mercure et de Vénus. La première détection d'ondes de type chorus autour de Mercure a été réalisée et les premières mesures de profils de densités ont été combinées avec des simulations MHD 3D pour reconstruire les différentes frontières rencontrées. Les mesures *in situ* du plasma ont révélé l'occurrence d'injections impulsives d'électrons précipitant à la surface de la planète semblables à ceux observés sur Terre lors des orages magnétiques.

L'analyse conjointe des données de **BepiColombo** au voisinage de Vénus, et de **Solo** en amont dans le vent solaire, confrontée à de nouvelles simulations numériques, a montré qu'en dépit d'une faible ionisation due aux conditions solaires et de l'absence de champ magnétique, l'atmosphère de

Vénus pouvait s'opposer efficacement à la pression du vent solaire en créant une région de stagnation s'étendant jusqu'à 1900 km au-dessus de la surface (Fig. 3).

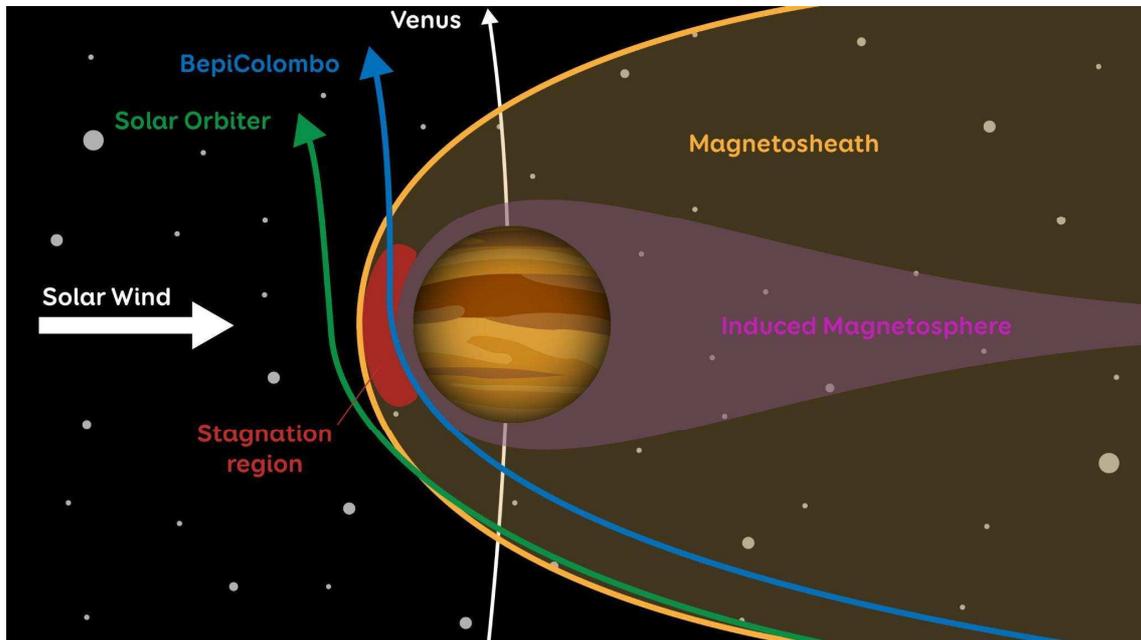


Fig. 3. Schéma de la région de stagnation du vent solaire au voisinage de Vénus (rayon 6050 km) observée par SoLo et BepiColombo en Août 2021. [EuroPlanet Society].

Les missions étudiant l'environnement de la Terre ont également livré de nouveaux résultats.

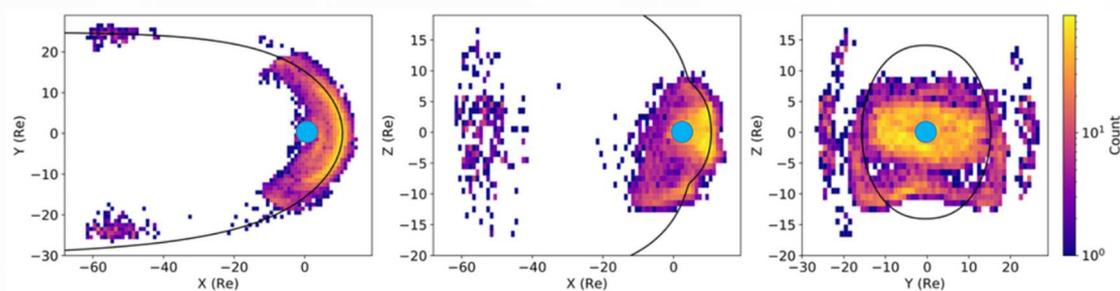


Fig. 4 : Distribution spatiale de 15 000 traversées de la magnétopause terrestre détectées par des techniques de machine learning, dans trois plans orthogonaux. La ligne noire représente un modèle standard de magnétopause. [Nguyen et al., 2022b].

La mission **Cluster** (Esa, 2000) a fourni des résultats de premier plan notamment grâce à la grande quantité de données acquises et à l'utilisation de techniques de « machine Learning » (Fig. 4). Un entraînement massif sur ces données ainsi que celles des missions **Themis**, **Magnetospheric Multiscale (MMS)**, et **Double Star** pour l'identification des frontières a montré comment la magnétopause dépend de l'orientation du champ magnétique du vent solaire et a confirmé qu'elle est effectivement indentée au niveau des cornets polaires, ce qui faisait l'objet d'un débat de longue date. Le modèle analytique de cette frontière a finalement été mis à jour et le drapé des lignes de champs autour de la magnétosphère a pu être décrit de manière plus complète. L'analyse des données de la mission **MMS**, souvent accompagnée de simulations numériques très poussées, continue de nous révéler l'importance et la complexité des phénomènes plasmas dans l'environnement de la Terre. Elle a notamment montré l'intrication entre la reconnexion magnétique

et la turbulence aux échelles cinétiques et a mis en évidence l'importance de la structure fine des événements de transfert de flux pour le transport du plasma à travers la magnétopause. Des méthodes d'apprentissage ont été utilisées pour détecter un grand nombre de régions de diffusion électronique, ces petites régions où opère la reconnexion magnétique, et étudier leur variabilité selon les paramètres à grande échelle du milieu.

Une attention renouvelée a été portée à l'étude de l'ionosphère, en particulier aux régions équatoriales et à l'ionosphère basse qui est largement méconnue. Des réflexions ont démarré sur l'observation de ces régions depuis le sol grâce à des récepteurs VLF en ajout des radars Superdarn, et depuis l'espace avec notamment la Phase 0 du projet **Daedalus** de l'Esa qui a été menée à bien avec une forte implication française. Les données des satellites **Swarm** ont permis d'étudier l'effet des vents thermosphériques sur l'asymétrie de l'anomalie équatoriale d'ionisation, ainsi que de développer pour la première fois un modèle de courants électriques dans la région F de l'ionosphère à basses et moyennes latitudes.

La communauté a malheureusement aussi été marquée par l'échec du lancement de **Taranis**, qui visait à étudier le couplage entre les orages atmosphériques et l'environnement spatial. Elle a su rebondir, d'abord en proposant une mission **Taranis 2**, hélas rapidement abandonnée pour raison budgétaire, puis en développant une instrumentation visant à caractériser plus partiellement certains de ces phénomènes transitoires à bord de ballon et de nanosatellites. Les mesures obtenues en avion à 20 km d'altitude par la Nasa montrent que les phénomènes de couplage entre le rayonnement cosmique et les nuages orageux sont beaucoup plus fréquents qu'attendus. Ceci souligne l'importance des mesures ballons auxquelles la communauté française s'est préparée en développant une instrumentation gamma dédiée et des instruments de mesure du champ électrique continu et des émissions radios.

1.4. MÉTÉOROLOGIE DE L'ESPACE

Les études de météorologie de l'espace ont été structurées par la participation de la France dans le programme *Space Safety* (S2P) de l'Esa en fournissant des services pré-opérationnels dédiés aux utilisateurs du portail Esa SWE Network Portal (<https://swe.ssa.esa.int/>). L'investissement de la communauté dans les services d'observations sol ou espace du Programme National Soleil-Terre (PNST²) pour produire les données et outils nécessaires et le soutien financier de l'APR joue un rôle essentiel dans la capacité de la communauté à produire des services valorisables en météorologie de l'espace. Parmi ceux-ci, on peut citer :

1. Le calcul de propagation du vent solaire, des éjections de masses coronales (CME), et des particules énergétiques ;
2. La restitution et la prévision des risques satellites associés à la dynamique des ceintures de radiation ;
3. La prévision du cycle magnétique de 11 ans du Soleil ;
4. La production de carte de radiation à l'altitude des avions.

Cette mobilisation importante de la communauté française pour la météorologie de l'espace s'est particulièrement manifestée lors de l'organisation à Toulouse de la European Space Weather Week du 17 au 24 novembre 2023, évènement majeur de la discipline en Europe qui a réuni plus de 700 participants de 46 pays, avec d'importantes participations française, européenne, et américaine.

2. PROSPECTIVE ET RECOMMANDATIONS

2.1. COMMENT LE SOLEIL FONCTIONNE ET CONTROLE L'HELIOSPHERE ?

La poursuite de **SoHO**, qui débutera sa sortie du plan de l'écliptique en 2025 avec un angle de 15° en phase nominale, jusqu'à 33° en phase étendu au-delà de 2027, permettra de poursuivre la caractérisation de l'héliosphère interne et une première observation, partielle, des pôles solaires.

² https://pnst.ias.u-psud.fr/sites/pnst/files/Executive_Summary_prospective_PNST_2024_Final.pdf

PSP devrait être étendue avec la même orbite, soit un périhélie à 9,9 rayons solaires, pour continuer d'étudier le vent solaire au plus proche du Soleil. Certaines questions essentielles ne sont pas abordées par ces missions, soit car elles ne possèdent pas l'instrumentation nécessaire, soit car elles laissent certaines régions inexploitées. La priorité majeure est d'étudier les processus de dissipation 1) dans le vent solaire grâce à la première constellation multi-échelles **HelioSwarm**, et 2) dans l'atmosphère solaire grâce à la mission haute résolution **Solar-C**.

2.1.1. Quels sont les processus de dissipation dans les plasmas spatiaux ?

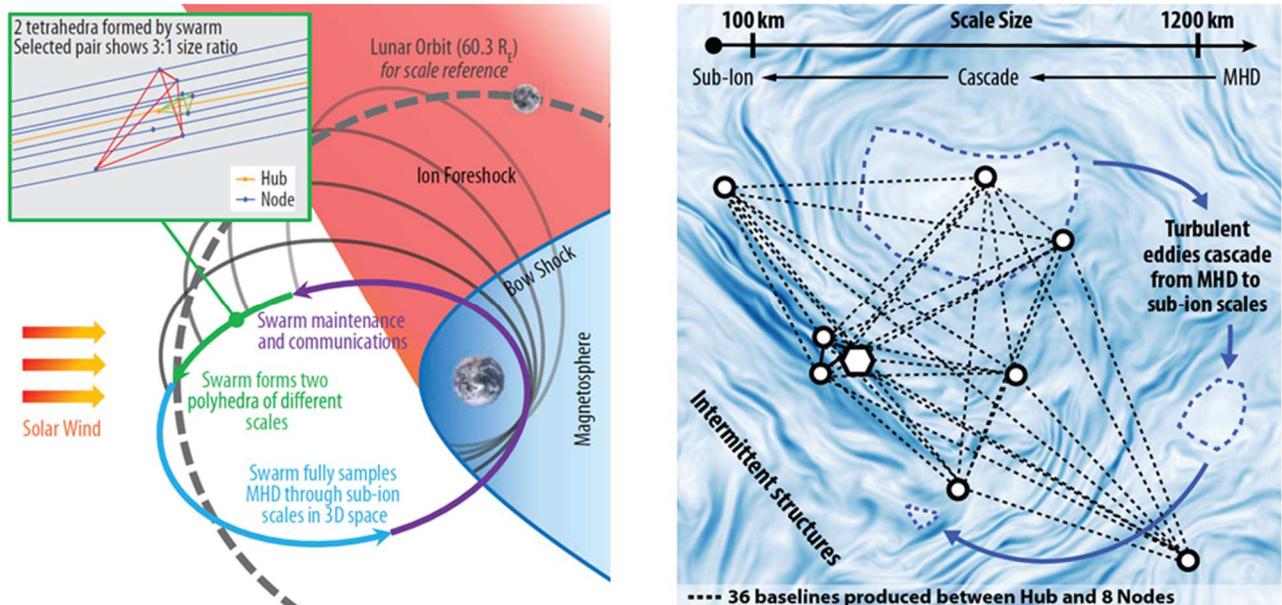


Fig. 6. *Orbite de la constellation HelioSwarm (gauche) et schéma (droite) montrant les séparations typiques entre les satellites, des échelle sub-ioniques aux échelles fluides. [Proposition mission HelioSwarm à la Nasa]*

Dans le vent solaire, la priorité majeure est l'étude multi-échelles de la turbulence en participant à la mission **HelioSwarm**. La turbulence reste l'un des grands problèmes de la physique non encore résolus. Elle joue un rôle crucial à la surface du Soleil et dans les magnétosphères planétaires, mais également dans le vent solaire où une turbulence non contrainte par des frontières existe et pourrait notamment expliquer le faible refroidissement des ions observé à grande distance du Soleil. La turbulence est un processus intrinsèquement multi-échelles car elle désigne le mécanisme par lequel l'énergie injectée à l'échelle d'un système se transporte vers les plus petites échelles par les fluctuations du champ magnétique et celles des mouvements du plasma. La dissipation désigne le processus par lequel les fluctuations cèdent leur énergie aux particules, ce qui correspond à un chauffage. Les précédentes missions ont montré qu'il faut observer plusieurs échelles simultanément pour caractériser et comprendre les processus turbulents et de dissipation. Cette caractérisation multi-échelles n'est possible qu'avec une constellation d'au moins cinq satellites. C'est l'objectif de la mission **HelioSwarm** de la Nasa (lancement en 2029), constituée d'un essaim composé pour la première fois d'un satellite mère et de huit satellites filles, plongé dans le vent solaire. L'instrumentation sera identique sur les neuf satellites et le satellite mère disposera également d'un analyseur électrostatique ionique pour caractériser le chauffage des ions. Les laboratoires français ont été fortement sollicités sur cette mission puisqu'ils sont appelés, grâce à leur expertise technique, à fournir deux des quatre instruments : les neuf magnétomètres de type Search-coil et l'analyseur électrostatique ionique. Cette implication forte donnera à la France une place solide dans l'exploitation de cette mission novatrice, qui permettra de déterminer la structure spatio-temporelle de la turbulence plasma et le transfert d'énergie des échelles fluides aux échelles ioniques. Une autre priorité importante mais qui ne dispose pas de cadre programmatique défini à

l'heure actuelle est de réaliser des mesures multi-échelles incluant les échelles électroniques, car celles-ci jouent également un rôle important dans les processus plasmas.

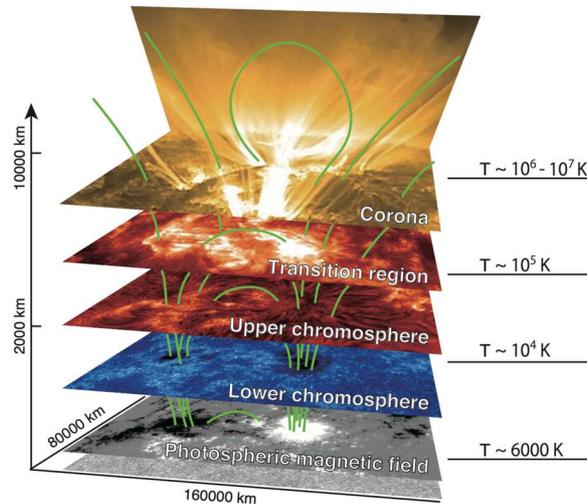


Fig. 5. Couplage entre les différentes couches de l'atmosphère solaire. [Proposition **Solar-C** à la JAXA].

Dans l'atmosphère solaire, les observations les plus récentes de **Solo** ont montré l'omniprésence de structures fines et dynamiques qui résultent du couplage entre les différentes 'couches' de l'atmosphère via le champ magnétique (Fig. 5). Les mouvements dans la photosphère sont la source de l'injection d'énergie dans les couches supérieures, mais les échelles spatiales et temporelles impliquées dans les processus de dissipation de l'énergie magnétique en chauffage n'ont pas encore été résolues ni observées dans une gamme de température suffisante pour les caractériser. C'est notamment le cas pour les « Campfires » pour lesquels **Solo** a des capacités de diagnostic limitées. Il faut donc observer ces petites échelles spatiales et temporelles pour savoir comment la masse et l'énergie sont transportées, emmagasinées et converties de la chromosphère à la couronne. C'est l'objet de la mission **Solar-C** de la Jaxa (lancement 2028), qui pourra effectuer un diagnostic poussé de ces événements de chauffage grâce à son spectrographe EUVST qui disposera d'une très haute cadence et résolution angulaire et couvrira une large gamme de températures. La France, de par son expertise sur les optiques EUV, a été sollicitée pour contribuer à la réalisation d'EUVST ; une phase A a été conduite au Cnes et une décision sur l'engagement de cette contribution en phase BCDE1 devrait être prise prochainement. La participation à la mission **Solar-C** est une priorité majeure.

Une priorité substantielle mais qui ne dispose pas actuellement de contexte programmatique défini est la mesure du champ magnétique dans l'atmosphère solaire, qui est une grandeur fondamentale pour la dissipation d'énergie dans ce milieu. Notre connaissance du champ magnétique coronal est principalement basée sur des modélisations extrapolant les cartes du champ photosphérique, et les résultats dépendent des hypothèses propres à chaque modèle. Le spectropolarimètre **Clasp** (dont la France est co-PI) a volé trois fois à bord de fusées sonde et a démontré la faisabilité de la mesure du champ magnétique coronal par l'effet Hanle. De futures missions d'opportunités pourraient embarquer ce type d'instruments et effectuer ainsi ces nouvelles mesures.

2.1.2. Quelle est la variabilité de l'héliosphère et quelle est son origine ?

Comprendre la variabilité de l'héliosphère nécessite aujourd'hui de multiplier les points de vue, en observant le Soleil à différentes longitudes et latitudes et en explorant l'héliosphère externe et ses

frontières avec le milieu interplanétaire. Il sera essentiel d'observer directement les pôles solaires, qui jouent un rôle majeur dans le cycle solaire, ainsi que d'observer notre étoile depuis plusieurs points de vue simultanément.

Plusieurs missions proposées au Decadal Survey pour la physique héliosphérique de la Nasa adressent ces objectifs. La participation française à cette future grande mission de l'héliophysique est une priorité substantielle de la communauté. Un premier concept de mission propose de réaliser des observations multipoints du Soleil permettant une couverture à 360° et une reconstruction 3D de l'environnement solaire. Une autre mission propose une constellation à des distances plus petites pour la caractérisation multipoints du vent solaire et des éjections de masse coronale lors de leur propagation. Un troisième concept propose de visiter les limites de l'héliosphère, leurs variabilités, et l'espace interstellaire local.

Enfin, la mission de météorologie spatiale **Vigil**, prévue dans le programme Space Safety (S2P) de l'Esa, propose de surveiller le Soleil depuis le point de Lagrange L5 pour caractériser notamment la propagation des éjections de masse coronale en les observant par la tranche lors de leur propagation Soleil-Terre. La France est sollicitée par un consortium de la Nasa pour participer à l'imager EUV JEDI, ce qui constitue une priorité substantielle.

2.2. COMMENT SE CREENT ET VARIENT LES ENVIRONNEMENTS TERRESTRES ET PLANETAIRES ?

La poursuite des études sur les environnements terrestre et planétaires devra emprunter plusieurs voies. Il s'agit d'une part d'utiliser la possibilité nouvelle de réaliser des mesures multi-échelles pour comprendre les phénomènes de transfert d'énergie et d'accélération des particules dans la magnétosphère terrestre, alors que la mission **Cluster** finira en 2024, et d'autre part de réaliser une exploration plus poussée des autres magnétosphères du système solaire, avec leur particularité, à commencer par la magnétosphère martienne où nous pouvons maintenant étudier l'impact du forçage solaire sur l'environnement martien de façon plus complète. La priorité majeure est la participation à la prochaine mission M7 de l'Esa si celle-ci étudie la magnétosphère terrestre ou martienne. La magnétosphère d'Uranus, dont l'axe de rotation est dans le plan de l'écliptique, est également particulièrement intéressante par sa configuration unique, et représente une priorité substantielle, tout comme l'étude de l'ionosphère et des couplages atmosphère-ionosphère au-dessus des zones orageuses, objet de la mission **Taranis** perdue au lancement.

2.2.1. Comprendre l'énergisation et la dynamique dans les environnements terrestre et planétaires

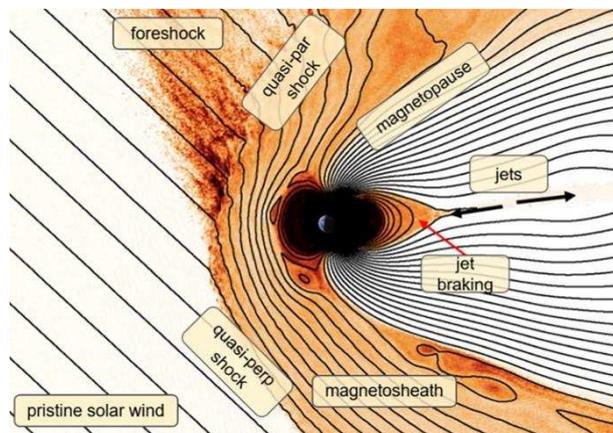


Fig. 7. Zones de la magnétosphère terrestre où prennent place des phénomènes de transfert d'énergie et de couplage entre échelles. [Retino et al., 2021]

Les phénomènes d'énergisation des particules et de transport de l'énergie jouent un rôle clé dans la dynamique de multiples objets astrophysiques. Ils sont un ingrédient essentiel pour la formation des différentes zones des magnétosphères planétaires et terrestre (Fig. 7). Le cas terrestre constitue un laboratoire idéal pour comprendre ces phénomènes car il est plus aisément accessible à la mesure *in situ*. Les constellations de quatre satellites actuelles **Cluster** et **MMS** ont permis des avancées importantes dans l'identification et la quantification des processus plasmas responsables de la conversion d'énergie électromagnétique en énergie cinétique et de la dynamique de la magnétosphère terrestre. Bien qu'une constellation de quatre satellites ne puisse observer qu'une seule échelle spatiale à la fois, ces observations mono-échelles couplées avec les simulations suggèrent que le couplage entre les échelles fluides (magnétohydrodynamiques) et les échelles cinétiques (ioniques puis électroniques) ont un rôle important dans la plupart des processus plasmas. Un consensus s'est établi dans la communauté pour proposer un dispositif de mesure ambitieux couvrant simultanément les échelles ioniques et fluides. La mission **Plasma Observatory** sélectionnée en Phase A compétitive pour la mission M7 de l'Esa propose de placer sept satellites dans une configuration contrôlée afin de former deux tétraèdres à deux échelles différentes dans les régions clés du système magnétosphérique. La mise en œuvre d'une instrumentation miniaturisée et innovante dans laquelle la France joue un rôle de premier plan rend aujourd'hui possible cette mission qui devrait révolutionner notre compréhension des phénomènes d'énergisation des particules et de transport de l'énergie observés universellement.

L'exploration des magnétosphères planétaires revêt une importance cruciale pour approfondir notre compréhension de l'origine, l'évolution et l'habitabilité des planètes ainsi que leurs environnements plasmas et le couplage avec le vent solaire. Cela permet aussi de mieux appréhender les processus fondamentaux à l'œuvre dans les milieux astrophysiques divers.

L'exploration poussée de l'environnement spatial martien est nécessaire pour comprendre l'évolution du climat martien et la réponse de la planète aux événements solaires. Les interactions entre les différentes régions de l'environnement martien sous l'effet du vent solaire et du flux radiatif sont complexes et multidimensionnelles, et leur caractérisation nécessite des données provenant de sondes à différents endroits simultanément. La mission **M-Matisse** (*Mars Magnetosphere Atmosphere Ionosphere and Space-weather Science*, Fig. 8), également sélectionnée en Phase A compétitive pour la mission M7 de l'Esa, propose, grâce aux observations simultanées et coordonnées de ses deux orbiteurs, de cartographier l'ionosphère et la basse atmosphère de Mars simultanément et de découpler ses variations spatiales et temporelles. **M-Matisse** représente une étape majeure dans l'exploration de la magnétosphère martienne et permettra d'explorer en profondeur la physique de la météorologie de l'espace martien, de la magnétosphère à la surface, et de contraindre l'environnement radiatif de la planète. Cette mission contribuera ainsi au développement des outils nécessaires à l'exploration robotique de Mars des prochaines décennies.

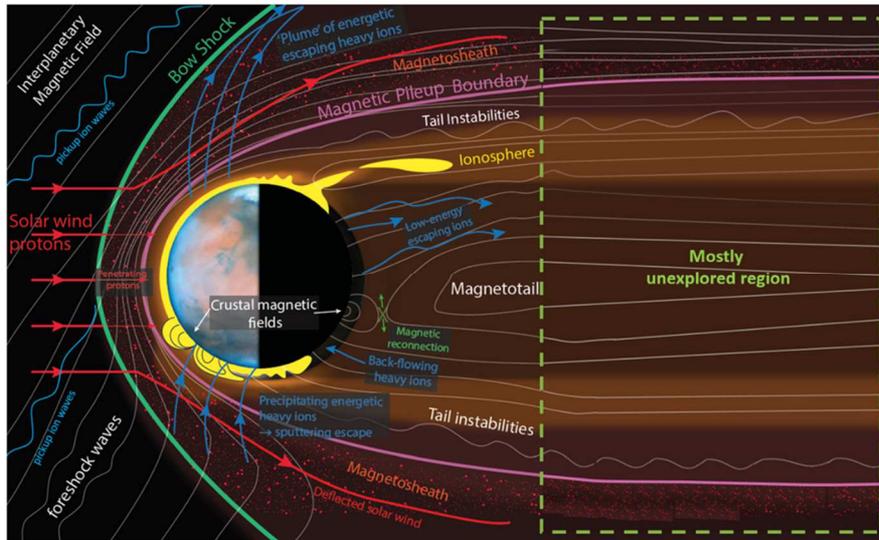


Fig. 8. Illustration de la magnétosphère induite de Mars et des processus physiques qui dominent sa dynamique [Sánchez-Cano, et al. 2021].

Sur ces deux missions en phase A compétitive, **Plasma Observatory** et **M-Matisse**, les laboratoires français ont su valoriser les R&T effectués notamment dans le cadre de la phase 0 SPEED et jouent un rôle majeur dans la définition et réalisation de leurs charges utiles.

Enfin, le système d'Uranus, survolé par **Voyager 2** en 1986, est sans équivalent dans le système solaire, avec une rotation d'environ 17h autour d'un axe incliné de 98° par rapport au nord céleste et un champ magnétique incliné de 60° par rapport à l'axe de rotation. Ce champ produit une magnétosphère asymétrique à rotation rapide qui adopte des configurations extrêmement différentes au solstice et à l'équinoxe. La première priorité du Decadal Planétologie et Astrobiologie de la Nasa pour la prochaine mission flagship est le concept de mission **Uranus Orbiter and Probe**, qui offre une opportunité unique d'étudier cette magnétosphère atypique. L'étude de la magnétosphère d'Uranus est une priorité substantielle.

2.2.2. Comprendre le couplage Atmosphère-Ionosphère-Magnétosphère

L'ionosphère terrestre est un milieu extrêmement variable et dynamique et ses couplages avec la magnétosphère et l'atmosphère restent trop mal compris. On pourra citer comme exemple la difficulté d'identifier clairement les causes de la perte de nombreux satellites Starlink en février 2022. Couplées à des modèles multi-fluides d'ionosphère, des mesures multipoints permettant une couverture spatiale significative du système ionosphère/thermosphère sont nécessaires pour comprendre ces couplages impliquant des zones différentes, et constituent une priorité substantielle. Des projets de constellations ionosphériques proposés à la Nasa comme les mission **GDC** (Geospace Dynamics Constellation) et **Dynamic** (Dynamical Neutral Atmosphere-Ionosphere Coupling) permettraient de combler au moins partiellement ces lacunes observationnelles, mais d'autres opportunités pourraient apparaître. L'étude de la précipitation dans l'ionosphère des particules chargées (électrons et protons) et des ceintures de radiation est également essentielle à la compréhension de la dynamique ionosphérique. La basse ionosphère (100-200 km d'altitude) est une région clef pour la transition entre l'atmosphère et l'espace. La physique qui s'y joue est particulièrement intéressante car elle implique le couplage entre les fluides de l'atmosphère et le plasma ionosphérique, ainsi qu'une chimie particulière. Elle reste cependant peu étudiée *in situ* notamment à cause de freinage atmosphérique important à ces altitudes. Suite au projet de mission **Daedalus** (arrêté en fin de phase A), un groupe de travail Esa/Nasa ENLoTIS (Esa/Nasa Lower Thermosphere-Ionosphere Science) s'est constitué et de nouveaux projets pourraient prochainement apparaître.

L'étude des couplages électromagnétiques entre les nuages d'orage dans la troposphère et l'ionosphère, ainsi que les couches supérieures de l'atmosphère est un domaine actif de recherche

et une priorité substantielle du groupe SHM. En particulier, des phénomènes conduisant à d'intenses émissions de photons de haute énergie appelés **flashes gamma terrestres (TGF)** suscitent un très fort intérêt de par leurs aspects fondamentaux et sociétaux (risques radiatifs). Le projet **Bees**, soumis pour une phase 0 au CNES, propose l'utilisation de plusieurs nanosatellites en formation et équipés d'un spectromètre gamma rapide et d'un instrument radio HF pour améliorer significativement notre connaissance des TGF. La détection multipoints permet l'étude de la géométrie du faisceau tandis que les mesures radio permettent la caractérisation des phénomènes d'accélération encore mal connus ainsi que le contexte électrique. Ces mesures seraient complémentaires de celles prévues plus proches des sources grâce à des campagnes de ballons stratosphériques (BSP et BLD) en conditions orageuses (projets Oreo et Stratelec).

Enfin, les corps qui ne possèdent pas d'atmosphère dense (Lune, Mercure, astéroïdes ou satellites glacés) sont directement et constamment exposés aux effets de l'irradiation solaire et du bombardement par les particules du vent solaire ou les impacts micro-météoritiques. Plusieurs missions récentes ont révélé une variété de phénomènes résultant de l'interaction du régolithe et de l'exosphère lunaire avec le vent solaire : « mini-magnétosphères » autour des anomalies du champ magnétique crustal, potentiel électrique entre la surface lunaire et le plasma ambiant qui favorisent la production de plasmas poussiéreux complexes. Au-delà de Mercure avec BepiColombo et Mars avec MMX, les programmes d'exploration lunaire de l'Esa et de la Nasa pourraient fournir l'opportunité d'étudier ces phénomènes sur la lune.

2.3. R&T

Les actions de R&T entreprises ont porté leurs fruits et permettent à la communauté française de jouer un rôle de premier plan dans plusieurs projets de l'Esa : **Comet-Interceptor, Plasma Observatory, M-Matisse**. Les défis à relever dans les années à venir sont multiples. En particulier, l'effort de miniaturisation des capteurs devra se poursuivre afin de tirer pleinement partie des nombreuses opportunités offertes par le développement des nanosatellites, que ce soit dans le cadre de projets scientifiques ou bien pour la météorologie de l'espace. Trois axes sont à approfondir en particulier : le développement d'une version nanosatellite du concept de caméra plasma 3DCAM ; l'évolution du récepteur radio haute fréquence PERL pour le rendre tolérant aux radiations pour l'exploration d'Uranus ; et la miniaturisation des magnétomètres initiée avec la R&T MAROT.

2.4. SYNTHÈSE DES RECOMMANDATIONS

Objectif scientifique	Priorité	Types de mesures	Cadre de réalisation
Élucider les processus de dissipation dans l'atmosphère du Soleil et le vent solaire	Majeure	Mesures multi-échelles et haute résolution des plasmas spatiaux	<ul style="list-style-type: none"> • Solar-C (Phase A+, lancement 2029) • HelioSwarm (Nasa, phase B1, lancement 2029) • Ex : Debye
Comprendre l'énergisation et la dynamique dans les environnements terrestre et planétaires	Majeure	Mesures <i>in situ</i> multipoints et multi-échelles dans les ionosphères et magnétosphères	<ul style="list-style-type: none"> • Plasma Observatory, M-Matisse (CALL Esa/M7, Phase A compétitive en cours, 2035)

Explorer de nouvelles régions de l'héliosphère	<i>Substantielle</i>	Mesures et observations de l'héliosphère externe, des environnements des géantes glacées, des régions polaires du Soleil	<ul style="list-style-type: none"> • Decadal Heliophysique (Nasa, 2037) • Uranus Orbiter and Probe (Nasa, 2037) • Vigil
Comprendre le couplage Atmosphère-Ionosphère-Magnétosphère	<i>Substantielle</i>	Mesure <i>remote sensing</i> des régions source et mesures <i>in situ</i> des espèces neutres et ionisées	<ul style="list-style-type: none"> • Bees (phase 0 CNES) • Constellations ionosphériques • ENLoTIS • Mesures Ballons
Améliorer les modèles physiques de météorologie de l'espace	<i>Modérée</i>	Mesures des observables de météorologie de l'espace en différentes positions de la magnétosphère et de l'ionosphère	Par opportunité <i>Esa/Nasa</i> , S2P, D3S, Lunar Gateway
Caractériser les interactions vent solaire - surface lunaire	<i>Modérée</i>	Mesures <i>in situ</i> à la surface de la lune	<ul style="list-style-type: none"> • Atterrisseurs lunaires