

Programme National Soleil-Terre



Bilan 2019-2023 &
Prospective 2025-2029

Plan

1. Identité et grandes questions thématiques du PNST	3
1.1. Par l'étude d'objets astrophysiques	3
1.1.1. Le Soleil magnétique ; son intérieur et son atmosphère	3
1.1.2. Le vent solaire ; depuis le Soleil jusque dans le milieu interplanétaire	3
1.1.3. Les magnétosphères et ionosphères ; Terre, planètes, exoplanètes	4
1.1.4. L'héliosphère ; jusqu'à son interaction avec le milieu interstellaire	4
1.2. Par la physique fondamentale des plasmas	5
1.3. Par l'approche systémique, globale	9
1.4. Par les applications sociétales avec la météorologie de l'espace	12
2. Trois faits saillants sur la période 2019-2023	15
2.1. Découverte sur Mercure d'une activité de type sous-orage magnétique	15
2.2. Première simulation MHD auto-cohérente du déclenchement d'une CME rapide	16
2.3. Génération de fluctuations aux échelles sub-ioniques par la reconnexion magnétique	16
3. Positionnement dans le contexte national et international	17
3.1. Les grands projets de la discipline, actuels et futurs	17
3.1.1. Projets au sol	17
3.1.2. Projets spatiaux	18
3.2. Activités du PNST aux interfaces	18
3.2.1. Physique des plasmas	18
3.2.2. Exploration du système solaire et de ses confins	19
3.2.3. Physique des étoiles et de leur environnement	19
3.2.4. Météorologie de l'espace	20
3.3. Forces et difficultés à l'international	21
4. Thématiques scientifiques, bilan et avenir	22
4.1. Fortes	22
4.2. En difficulté	24
4.3. Émergentes	25
5. Méthodologies, état des lieux et évolutions	26
5.1. Fortes	26
5.2. En difficulté	29
5.3. Émergentes	30
6. Colloque & Questions de prospective	32
6.1. Motivations et organisation du colloque du 8-12 janvier 2024	32
6.2. PNST et météorologie de l'espace	33
6.3. Les SNO du PNST	36
6.4. Prospective instrumentale	36
6.5. Prospective numérique	38
6.6. Enseignement, communication, science participative	41
6.7. Impact environnemental	43
7. Le PNST : des chiffres et des lettres	44
7.1. Composition du conseil scientifique 2020-24	44
7.2. Les laboratoires de la discipline 2019-23	44
7.3. Recrutements et tendances 2000-2023	45
7.4. Photographie de la communauté-recherche nationale 2019-23	47
7.5. Budget et partenaires du PNST	49
7.6. Publications 2019-2023	50
8. SWOT du PNST	51

1. Identité et grandes questions thématiques du PNST

Le programme national Soleil-Terre décline les grandes questions scientifiques de la discipline selon 4 approches distinctes mais complémentaires, à l'image de la communauté internationale dite « héliophysique » et des objectifs et projets qu'elle porte à l'échelle mondiale.

1.1 Par l'étude d'objets astrophysiques :

La première approche est la plus « classique », à savoir par objets. C'est souvent comme ça que la communauté est perçue, mais c'est rarement comme ça qu'elle se voit elle-même.

1.1.1 Le Soleil magnétique ; son intérieur et son atmosphère :

Le champ magnétique du Soleil est responsable de son cycle d'activité de 11 ans, ainsi que de toutes les manifestations de cette activité, les plus spectaculaires étant les éruptions solaires.

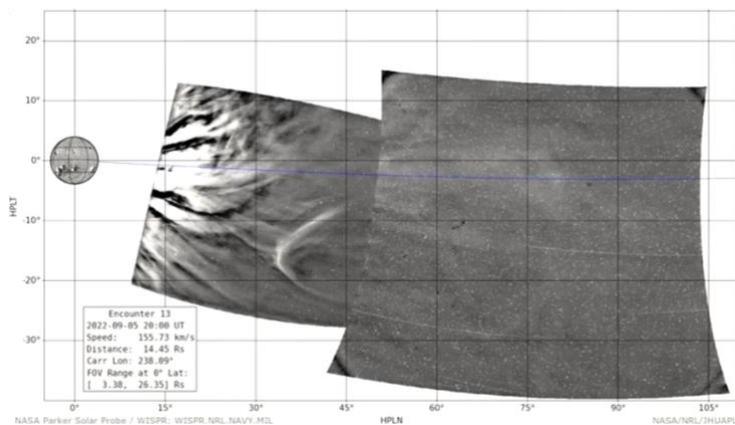
Ce champ magnétique est généré dans les profondeurs de l'étoile par une dynamo globale, ainsi que proche de sa surface par une dynamo locale. Il se déploie dans l'atmosphère solaire, où il produit un ensemble de phénomènes dynamiques tels que les taches (avec des champs de l'ordre de $B = 2000 - 3500$ G), les facules, les spicules, les filaments et protubérances, les jets, les boucles coronales, leur chauffage (de $T = 0.9 - 3$ MK), les flares, et de nombreux autres types d'événements, et où il produit des effets sur le rayonnement.

Le PNST étudie tous les aspects de la physique solaire ayant trait à l'origine et au rôle de ce champ magnétique dans tous ces phénomènes actifs du Soleil. Une particularité pour le PNST est que c'est son seul objet qui ne peut pas faire l'objet de mesures in-situ, donc son étude repose uniquement sur les observations à distance (rayonnement multi-longueur d'onde, et multi-messagers avec les particules) et sur la modélisation.



1.1.2. Le vent solaire ; depuis le Soleil jusque dans le milieu interplanétaire :

La couronne solaire s'étend vers l'espace interplanétaire sous la forme d'un vent magnétisé. Il entraîne avec lui le champ magnétique solaire dans une géométrie interplanétaire appelée spirale de Parker, qui structure toute l'héliosphère, et le long de laquelle se déplacent les particules énergétiques.



Le vent solaire souffle de manière essentiellement bimodale, avec un vent lent issu des grands jets solaires ($v = 450$ km/s à $R = 1$ ua) et un vent rapide issu des trous coronaux ($v = 800$ km/s à $R = 1$ ua). Mais il est perturbé entre une et plusieurs fois par jour par la propagation d'éjections de masse coronales (CME) issues d'éruptions solaires.

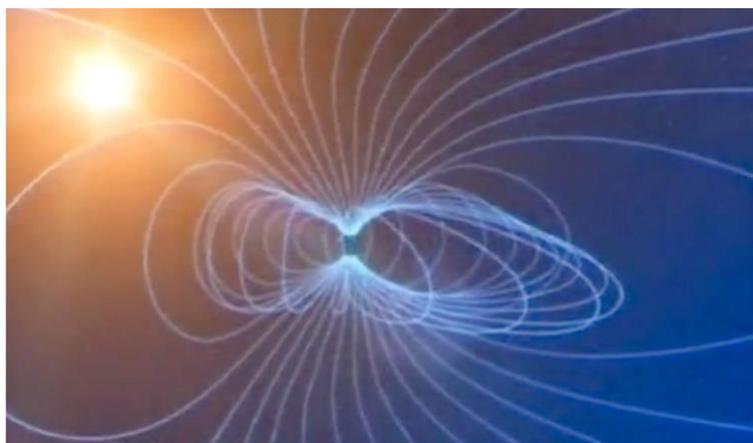
Le PNST étudie tous les processus physiques qui y ont lieu au-

delà des modèles idéalisés, notamment l'accélération du vent, sa cascade turbulente, la dissipation d'énergie, le chauffage du plasma ($T = 10^5$ K à $R = 1$ ua, dix fois plus élevé que par le seul effet adiabatique), la propagation et la déformation des CME et CIR (« Corotating Interaction Regions »), ainsi que l'origine et l'évolution des switchbacks qui sont présents partout à $R < 0.3-0.5$ ua et qui ont été découverts par Parker Solar Probe, et aussi vus par Solar Orbiter.

1.1.3. Les magnétosphères et ionosphères ; celles de la Terre, des planètes du système solaire, et des exoplanètes :

L'environnement spatial de la Terre, et des planètes magnétisées, est constitué d'une magnétosphère étendue, souvent ténue, où le plasma est non-collisionnel. Elle est en interaction avec le vent solaire du côté jour au niveau de la magnétopause (à 10 rayons terrestres pour la Terre). Proche de la Terre se situe l'ionosphère, partie haute et ionisée de l'atmosphère, qui est le siège de phénomènes électriques importants. Ses propriétés sont très variables selon la planète considérée.

L'étude de la magnétosphère terrestre a de nombreux intérêts. Non seulement c'est un laboratoire naturel de physique des plasmas magnétisés dans lequel on peut faire des mesures in-situ. A ce titre elle a d'ailleurs de nombreux points communs avec les plasmas de fusion par confinement magnétique (cf. Section 3.2.1). C'est aussi la région dans laquelle l'énergie des événements violents issus du Soleil est convertie en perturbations géomagnétiques et ionosphériques.



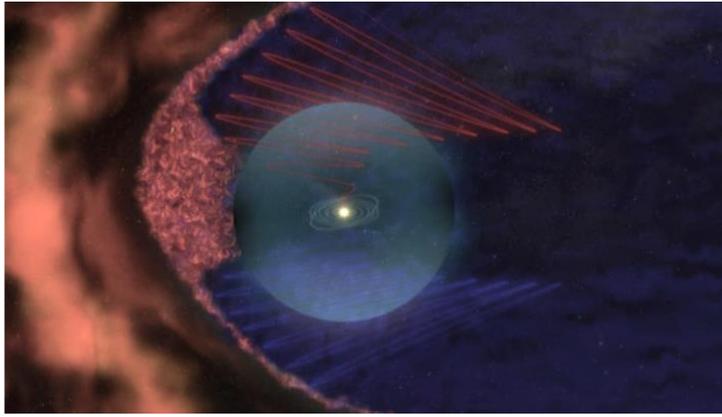
Il s'agit notamment des orages (globaux), des « flux-transfer events » (côté jour), des sous-orages géomagnétiques (côté nuit), des courants induits (avec des chemins spécifiques, notamment dans l'ionosphère), etc. Elle est au centre des problématiques qui concernent la météorologie de l'espace.

Par extension, les magnétosphères des autres planètes (et même de comètes) offrent autant d'opportunité de faire, aussi au PNST, de la planétologie comparée (cf. Section 3.2.2 synergies avec le PNP). Elles permettent par exemple d'étudier comment d'autres conditions (inter-)planétaires induisent d'autres comportements magnétosphériques, par exemples des couplages avec des satellites (Jupiter), l'effet d'une rotation rapide (Saturne et Jupiter) ou de l'inclinaison (Uranus), ou encore les couplages à l'œuvre lorsque la planète est faiblement magnétisée mais à des distances différentes du Soleil (Mercure et Mars). La transposition de tous ces résultats aux exoplanètes permet d'étudier l'observabilité de leurs magnétosphères hypothétiques et leur rôle dans la protection de l'exoplanète vis-à-vis du vent stellaire.

1.1.4. L'héliosphère ; jusqu'à son interaction avec le milieu interstellaire :

L'héliosphère constitue l'ensemble du milieu interplanétaire, et au-delà, au sein duquel souffle le vent solaire. C'est une cavité asymétrique remplie du plasma et du champ magnétique de la spirale du vent solaire, qui est entourée et confinée par le milieu interstellaire (MIS).

La frontière entre l'héliosphère et le MIS est l'héliopause. Elle est située à environ $R = 100$ ua dans la direction du mouvement du Soleil. Il existe cependant plusieurs frontières, au passage desquelles plusieurs processus physiques mal connus affectent le plasma extrêmement dilué et magnétisé de l'héliosphère, notamment le choc terminal, les héliogaines interne et externe, et le choc d'étrave potentiel.



L'étude de l'héliosphère externe a des intérêts particuliers liés entre autres aux régimes de plasmas qui y sont très différents (densités et champs faibles). Une nouvelle population d'ions appelée « pick-up » y est produite par échange de charge ou photo-ionisation. Elle devient la population dominante en termes de pression dans l'héliogaine interne. Faute de mesures adéquates (l'instrumentation sur Voyager I et II étant limitée et dégradée) les propriétés de cette population sont très mal

connues alors qu'elles sont fondamentales pour comprendre l'équilibre et la dynamique globale de l'héliosphère et de son interaction avec le MIS (cf. Section 3.2.2, synergies avec le PCMI). L'étude de l'héliosphère a également des intérêts évidents dans un but d'extrapolation de nos connaissances à d'autres astrosphères.

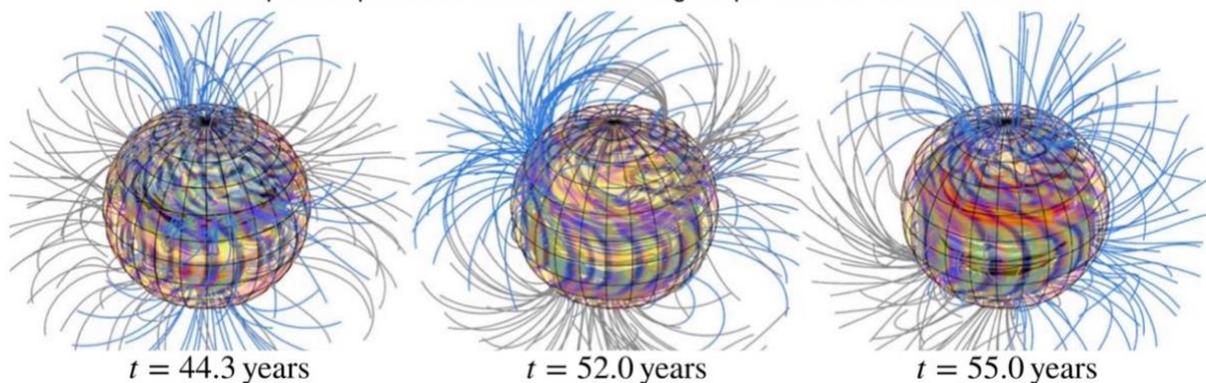
1.2. Par la physique fondamentale des plasmas :

Une deuxième manière de définir l'identité du PNST est à travers l'étude de la physique fondamentale, au sens de l'étude des processus de base dans les plasmas dans les conditions physiques (variées) que l'on peut trouver dans l'héliosphère, depuis l'intérieur du Soleil jusqu'à la frontière avec le milieu interstellaire. C'est en fait cette approche qui constitue un des liens principaux du PNST, qui permet à toutes ses équipes de « faire communauté ».

• Comment fonctionnent la dynamo solaire et le processus d'émergence de flux ?

Il s'agit de comprendre le fonctionnement de la dynamo solaire en particulier. Ceci s'inscrit dans le contexte plus général des dynamos planétaires et stellaires (cf. Section 3.2.3, synergies avec le PNPS). Plusieurs grands modèles sont en compétition, et les simulations numériques directes de dynamos en géométrie sphériques sont encore très récentes et font encore beaucoup d'hypothèses. Deux des grandes questions sont de savoir si le champ magnétique toroïdal est amplifié dans la tachocline mince, ou bien de façon distribuée dans la zone convective, et de comprendre la façon dont les deux hémisphères se couplent et se découplent l'une de l'autre.

Modélisation 3D MHD d'un cycle magnétique de type solaire,
et extrapolation potentielle de sa structure magnétique dans son environnement



Brun, Strugarek, Noraz et al. (2022), ApJ, 926, 21

Le fonctionnement de la dynamo solaire est donc encore loin d'être résolu, et la prévision des cycles solaires au moyen du calcul n'en est qu'à ses débuts.

La question de l'émergence du flux magnétique au travers de la photosphère et de la formation des taches solaires est encore ouverte et demeure une des grandes questions de la physique solaire. Les simulations d'émergence peinent à reproduire des régions actives à la bonne échelle. La formation des pénombres de taches n'est toujours pas réalisée dans les modèles de façon auto-cohérente. Le degré de neutralisation des courants électriques de surface, qui a un impact sur l'éruptivité, reste débattu. Le rôle de la diffusion ambipolaire reste à quantifier. La perfection du line-tying, qui suppose que les boucles coronales sont solidement ancrées dans la photosphère, est remise en question.

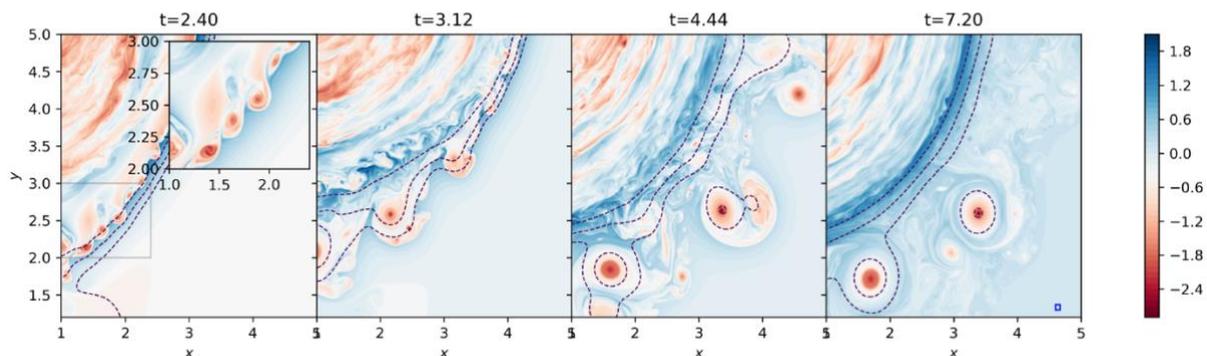
Toutes ces questions reviennent à celle de la physique fondamentale d'une interface mince de plasma très peu ionisée entre une zone convective dense à très fort beta et une couronne diluée à très faible beta.

• Comment se déclenchent les instabilités et les rétroactions aux grandes échelles ?

Les instabilités sont très fréquentes dans les plasmas héliosphériques, que ce soit dans le contexte de la MHD ou de la physique cinétique (liée à la forme de la fonction de distribution). Ces instabilités sont nombreuses, variées, se produisent à différentes échelles, et ont tendance conjointement à engendrer des rétroactions des petites vers les grandes échelles, et/ou vice-versa.

Un premier exemple est l'instabilité dite de tore en MHD idéale, en physique solaire, qui d'une part va faire gonfler une petite protubérance sous la forme d'une éjection de masse coronale (CME). Celle-ci atteindra une taille d'une fraction d'unité astronomique en arrivant à la Terre, et d'autre part va pincer le champ magnétique dans son sillage et provoquer de la reconnexion et chauffer la chromosphère solaire. Un deuxième exemple peut être l'instabilité bien connue de Kelvin-Helmholtz, mais dont les propriétés sont très différentes dans les plasmas où les températures ioniques sont très supérieures aux températures électroniques, où la turbulence se développe alors à l'extérieur des plasmoides précédemment formés.

Instabilités secondaires de type Kelvin-Helmholtz en reconnexion non-collisionnelle



C. Granier, E. Tassi, D. Laveder, T. Passot and P. L. Sulem, 2024, Phys. Plasmas 31, 032115

Un troisième exemple est l'instabilité double faisceau en physique des plasmas, typique en physique aurorale. Cette instabilité va générer des ondes et amplifier des courants électriques, qui vont à leur tour accélérer le plasma dans la magnétosphère, et donc avoir des conséquences aux grandes échelles. Un dernier exemple est l'instabilité miroir générée par les anisotropies de température du plasma, et dont le déclenchement et les caractéristiques varient en fonction du Beta. Elle est observée aussi bien dans les magnétosphères, que dans les gaines et le vent solaire. Enfin, des instabilités plasma fondamentales sont à l'origine d'ondes telles que les EMIC (electromagnetic ion-cyclotron) ou les Chorus dans la magnétosphère interne. Ces ondes, qui restent très étudiées y compris d'un point de vu théorique, sont extrêmement fondamentales à la dynamique des ceintures de radiation de la Terre, car elles contribuent au transport et à l'accélération des particules vers les hautes énergies, ou leur perte par précipitation sur Terre, selon le contexte.

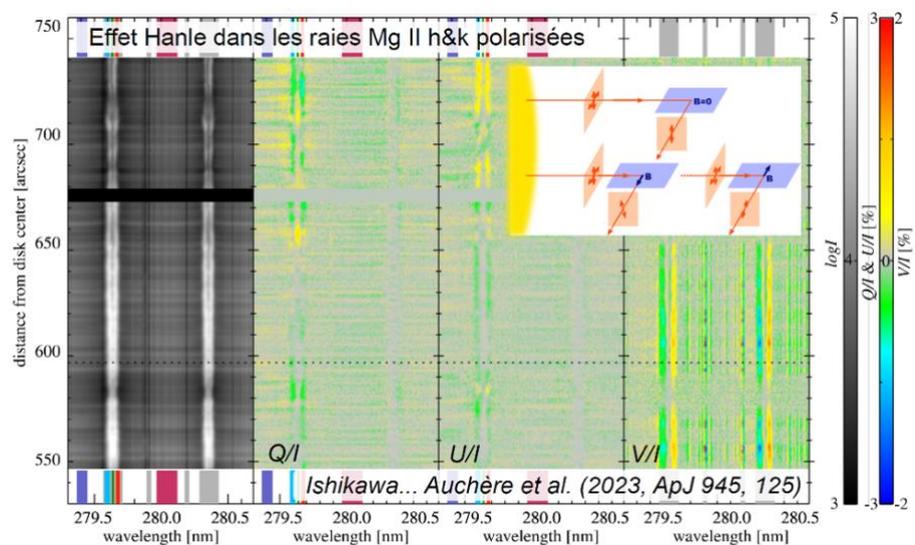
Si d'une part bon nombre de ces instabilités sont identifiées et connues de façon théoriques, les conditions de leur existence (ou pas) en situation héliophysique ne sont très souvent pas connues. Un des grands challenges de la communauté internationale reste encore, le plus souvent, d'identifier les instabilité(s) responsables de tel ou tel phénomène observé, plutôt que d'en préciser les effets physiques de deuxième ordre pour parfaire les modèles théoriques.

L'adaptation des théories aux instabilités plasmas dans les conditions des objets du PNST, mais aussi l'identification d'instabilités nouvelles spécifiques à ces conditions et de leurs propriétés, font ainsi l'objet de recherches fondamentales en tant que telles.

- **Quels sont les effets de physique atomique sur l'ionisation, le transfert radiatif, et la polarisation de la lumière ?**

Une part importante des observations dans la discipline se font en « remote-sensing » et avec de la spectroscopie, spectro-imagerie, et spectro-polarimétrie. Il s'agit pour l'essentiel de la physique solaire. Mais le remote-sensing est aussi utilisé pour l'observation des planètes et de l'héliopause, ainsi que pour les aurores terrestres ou le sondage ionosphériques. Il est donc important de bien comprendre les mécanismes physiques qui conduisent la lumière à être dans l'état dans lequel elle atteint les télescopes.

Ces mécanismes impliquent la mécanique quantique en physique atomique, la physique des collisions pour déterminer le taux d'ionisation et donc les raies des ions présents, le transfert radiatif multi dimensionnel en milieu inhomogène, et la polarisation de la lumière émise du fait du champ magnétique, ainsi que son rôle dans la dépolarisation des rayonnements incidents.



Les recherches dans ces domaines de physique atomique et du rayonnement, effectuées dans les conditions physiques des objets d'études du PNST, sont fondamentales pour la bonne compréhension des phénomènes qui y ont lieu. C'est sur elles que reposent la mesure des champs magnétiques solaires, qui sont le moteur de toute l'activité solaire. C'est grâce à des découvertes françaises sur ces sujets « connexes » dans les années 80 que la communauté internationale a bâti le modèle moderne des protubérances solaires et aujourd'hui celui des CMEs utilisé pour la météorologie de l'espace.

- **Quels sont les mécanismes d'accélération du plasma et des particules énergétiques et de dissipation par les chocs, la reconnexion magnétique, les ondes et la turbulence ?**

Les mécanismes d'accélération, de chauffage et de dissipation sont des sujets majeurs de recherches en physique fondamentale pour le PNST. Bien que les conditions locales du plasma dans lesquelles ces mécanismes se produisent sont variées, il convient de comprendre ces mécanismes d'un point de vue fondamental avant de les étudier dans le contexte des objets du PNST, tels que décrits dans la section prochaine section (approche systémique).

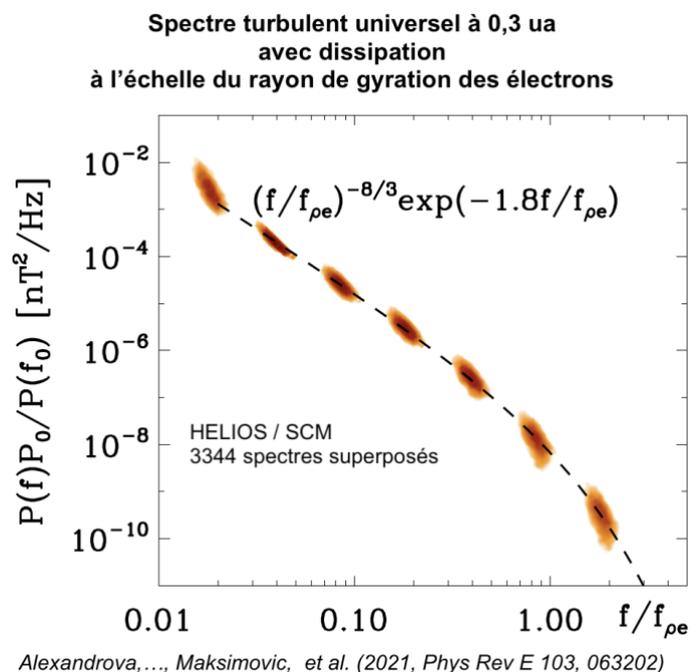
L'identification des forces responsables de l'accélération et du chauffage dans les plasmas non-collisionnels n'est pas trivial. Cela dépend non seulement du régime physique (beta, degré de collisionnalité, populations présentes, etc.), de la géométrie du problème, mais également du formalisme théorique utilisé pour l'interprétation (qui peut varier, et doit, en fait, être adapté en fonction du régime). Une étude préalable de ces considérations liées à l'environnement physique est nécessaire à toute étude d'un phénomène en héliophysique. Beaucoup de sujets liés à l'accélération et au chauffage dans les plasmas héliosphériques restent encore très débattus dans la communauté internationale, et font l'objet de recherche intenses. Par exemple, avec les quatre satellites de la mission Magnetospheric Multi Scale (MMS) qui permettent pour la première fois de mesurer des grandeurs physiques fondamentales comme la divergence (spatiale) des tenseurs de pression des particules. Ou encore en physique solaire, concernant la nature des forces qui accélèrent les grands jets étroits le long des boucles ouvertes, ou même ceux qui s'accordent sur le rôle de la tension magnétique travaillent encore sur l'origine de ladite tension dans ces événements.

L'accélération de particules aux hautes énergies est un sujet qui n'est pas propre au PNST, et les problématiques de physique fondamentale sont donc communes avec d'autres disciplines (cf. Section 3.2.1). Se posent notamment la question de l'efficacité de l'accélération par les chocs non-collisionnels, jusqu'à quelles énergies peut-on aller pour les particules, et aussi de la façon dont l'accélération a vraiment lieu au niveau de la reconnexion magnétique, soit de façon stochastique via des nappes de courant multiples, soit par des rebonds liés à des effets de rayon de Larmor fini ou des champs électriques.

Le sujet des particules énergétiques est totalement ouvert, et il est fondamental, car avec les CMEs, les particules énergétiques sont l'autre sujet essentiel de la météorologie de l'espace. Les processus tels que la reconnexion magnétique et les chocs sont transdisciplinaires, avec des applications et impacts dans divers contextes de physique fondamentales, depuis le laboratoire jusqu'aux confins de l'univers.

Le sujet de la dissipation d'énergie dans le cadre de la turbulence est tout aussi fondamental. Il touche aussi bien au chauffage du plasma dans les boucles de la couronne solaire qu'à la prévention du refroidissement adiabatique du vent solaire (les deux problématiques étant souvent, à tort, regroupées dans le sujet du « chauffage de la couronne solaire »). Et il concerne aussi la dissipation d'énergie dans les magnétosphères, notamment les magnétogaines et queues magnétosphériques turbulentes. Même là où le plasma est dans l'ensemble collisionnel (par exemple dans la couronne solaire), il ne l'est plus aux petites échelles où a lieu la dissipation. On entre donc dans ce qu'il y a de plus fondamental dans la physique des plasmas, avec les mécanismes de dissipation non-collisionnels au front des chocs, dans les nappes de courant de la reconnexion, ainsi que tout au bout de la cascade turbulente, là où la pente (en fait les pentes) n'est plus celle prédite par la phénoménologie Kolmogorov.

La compréhension des processus de dissipation de l'énergie, en particulier ceux associés aux petites échelles de la turbulence non-collisionnelle, relève de la physique fondamentale. Elle est par exemple un prérequis à une modélisation complète et auto-cohérente du vent solaire au sein duquel se propagent toutes les perturbations de la météorologie de l'espace.



1.3. Par l'approche systémique, globale :

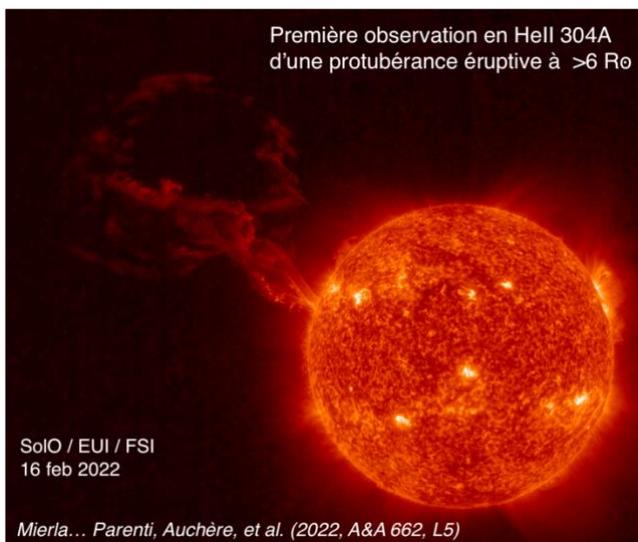
La troisième approche utilisée correspond à des questionnements plus globaux des phénomènes, ainsi que de leurs impacts sur des systèmes pouvant comprendre plusieurs objets (e.g., vent solaire-magnétosphère) et/ou mettre en œuvre plusieurs processus fondamentaux (e.g., choc et turbulence).

Les grandes questions et sujets associés sont très nombreux. Seules quelques exemples sont donnés dans les prochaines sections.

- **Comment l'activité magnétique, des taches aux éruptions solaires, est-elle générée ?**

Au-delà de la physique de la dynamo, sa simple localisation dans le contexte solaire, entre la tachocline et la zone convective elle-même, ou encore le recyclage des champs magnétiques aux niveaux des pôles de l'étoile au moment du changement de cycle, restent débattus voire largement inconnus à l'heure actuelle. Bien que les taches solaires et leurs champs magnétiques soient observés depuis longtemps, les mécanismes qui gouvernent leur formation et leur dispersion par émergence et par annihilation de flux au niveau des lignes d'inversion de polarité demeurent mystérieux.

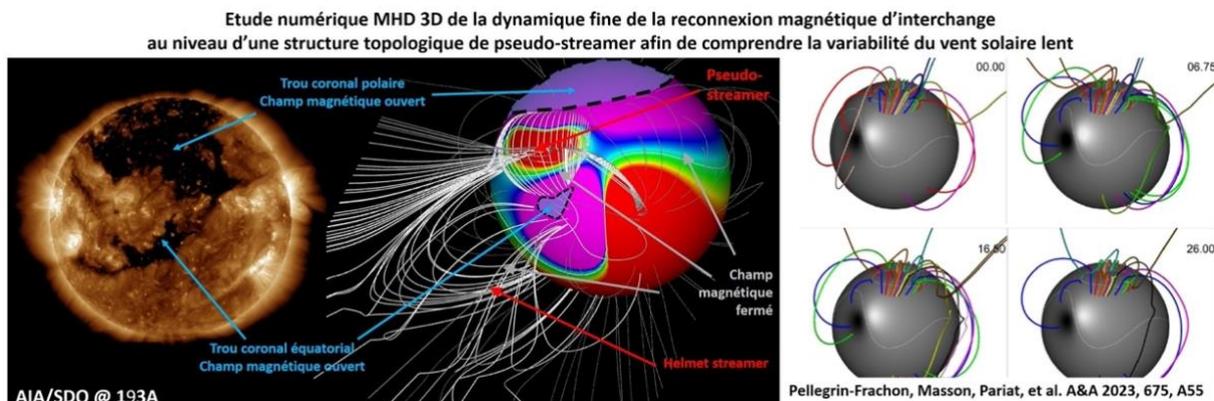
Quant aux éruptions solaires, les conditions nécessaires à leur occurrence et les mécanismes physiques qui régissent leur déclenchement restent encore mal compris, avec plusieurs modèles en compétition qu'il est très difficile de départager car donnant tous des prédictions observationnelles similaires.



Tous ces phénomènes solaires étant à l'origine de toutes les perturbations de l'environnement spatial de la Terre, ces questions constituent autant de sujets de recherche fondamentale en amont et au service de la météorologie de l'espace.

- **Quelles sont les origines et la nature de l'accélération et des perturbations du vent solaire ?**

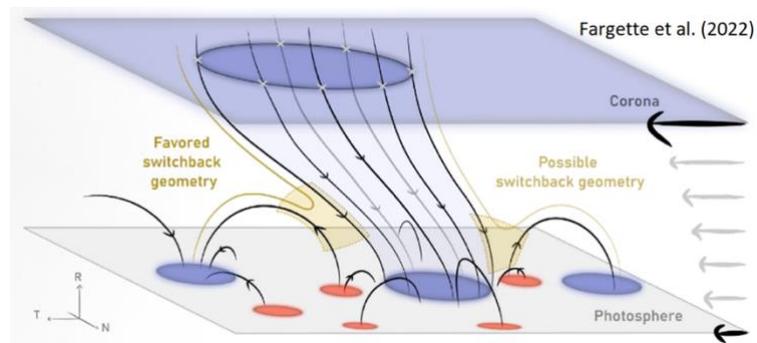
La théorie de Parker prédit l'existence d'un vent solaire ayant la vitesse du vent lent, mais issu directement de la surface solaire comme le vent rapide, et dans des conditions isotherme, collisionnelle, et stationnaire, qui ne sont pas satisfaites dans le vent solaire. Se posent alors, et encore aujourd'hui, de nombreuses questions physiques.



Si l'on se restreint au vent solaire bimodal lent-rapide, un sujet fondamental reste l'accélération du vent rapide, qui est probablement lié à des interactions ondes-plasma, mais dont la nature est encore mal comprise, notamment l'origine des ondes. Un autre sujet concerne la production du vent lent, dont on pense que la reconnexion magnétique dite d'interchange à grande échelle au niveau des streamers et pseudo-streamers joue un rôle majeur, mais dont le ou les mécanismes sous-jacents restent débattus.

Plus récemment avec les missions Parker Solar Probe et Solar Orbiter s'est posée la question de l'origine des switchbacks magnétiques au sein du vent solaire, avec encore aujourd'hui de nombreuses théories qui s'affrontent, les plus prometteuses étant associées à des mécanismes ayant lieu proche du Soleil plutôt qu'au cours de leur propagation. Enfin, reste la grande question du chauffage du plasma au sein du vent solaire, nécessaire à comprendre non seulement pour rendre compte des mesures in situ en fonction de la distance radiale dans le milieu interplanétaire (vitesse et température), mais aussi pour répondre à un enjeu de physique fondamentale des plasmas sur la dissipation turbulente d'énergie en régime non-collisionnel.

Si l'on considère, en plus du vent solaire bimodal, toutes les éjections de masse coronales (CME) qui s'y propagent, à savoir plusieurs par jour en période de maximum d'activité solaire, d'autres questions se rajoutent. Il s'agit par exemple du couplage aérodynamique entre le vent et les CME, y-compris leurs chocs. Ces couplages restent à ce jour très peu étudiés dans le régime non-collisionnel. Se posent aussi des questions sur les interactions entre les champs magnétiques des CMEs et du vent solaire ambiant, avec notamment la quantification de l'érosion des CME par reconnexion magnétique. Les modèles à l'état de l'art montrent que la propagation des CMEs et leur temps d'arrivée à la Terre sont très dépendants non seulement du modèle de CME, mais aussi du modèle de vent ambiant.

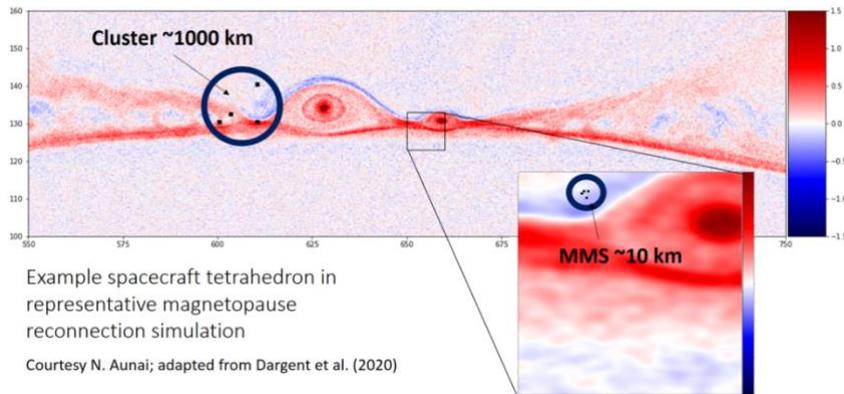


Ces questions de fond de physique du vent solaire et de l'évolution des CME interplanétaires font appel, en plus de différents milieux (photosphère, couronne puis vent solaire) et différents mécanismes (reconnexion, chocs, turbulence, etc.), à un couplage de différentes approches méthodologiques : théorie, modélisation et mesures in-situ.

- **Comment les magnétosphères et les enveloppes ionisées de la Terre et des planètes répondent à ces forçages, comment s'y déclenchent les événements impulsifs ?**

L'interaction entre vent solaire et magnétosphères constitue un système global impliquant une chaîne de processus complexe, dont de nombreux chaînons restent mal compris, ou tout simplement manquants pour certaines planètes. Dans le cas de la Terre, l'importance de la reconnexion magnétique dans la régulation de l'activité géomagnétique et le déclenchement des orages et sous-orages constitue un paradigme bien établi, mais la quantification de son impact reste en réalité à déterminer. Ceci résulte aussi du fait que l'impact des processus a priori plus secondaires reste à quantifier également (instabilité miroir ou de Kelvin-Helmholtz, turbulence dans la magnétosphère et dans la magnétogaine, interactions ondes-particules à la magnétopause et dans la magnétosphère, pour n'en citer que quelques-uns).

La communauté du PNST s'intéresse également aux autres planètes du système solaire, et en particulier Mars, Mercure et Jupiter dans le contexte de missions spatiales récentes. Leurs interactions avec le vent solaire sont très différentes de celle de la Terre, en raison de leurs distances, leurs tailles, leurs rotations, ou encore la présence ou non de sources de plasma internes significatives (issues de la planète elle-même ou de ses lunes). L'étude comparée de ces objets, outre l'importance fondamentale de mieux connaître et comprendre l'environnement et la dynamique du système solaire et de ses objets



en général, et outre l'intérêt déjà cité d'analyse des processus fondamentaux eux-mêmes (qui peuvent ainsi être étudiés dans des conditions différentes), permet d'extrapoler nos connaissances au contexte des interactions étoile-exoplanètes, à laquelle une partie de notre communauté s'intéresse à présent.

Enfin, l'aspect systémique des travaux du PNST apparaît très fortement lorsque l'on s'intéresse aux régions internes de la magnétosphère terrestre. Il est en effet difficile d'étudier une région particulière de la magnétosphère sans considérer les couplages primordiaux avec les milieux environnants. La queue magnétosphérique, les ceintures de radiations, la plasmasphère et l'ionosphère doivent le plus souvent d'être étudiées, ou du moins considérées, simultanément. Par exemple, l'étude des ceintures de radiation ne peut être menée à bien correctement sans une bonne connaissance des conditions aux frontières externes (densité de la queue de la magnétosphère, convection et potentiels ionosphériques), du forçage solaire (flux UV), des échappements ionosphériques, de l'étendue de la plasmasphère, ou encore des ondes, etc.

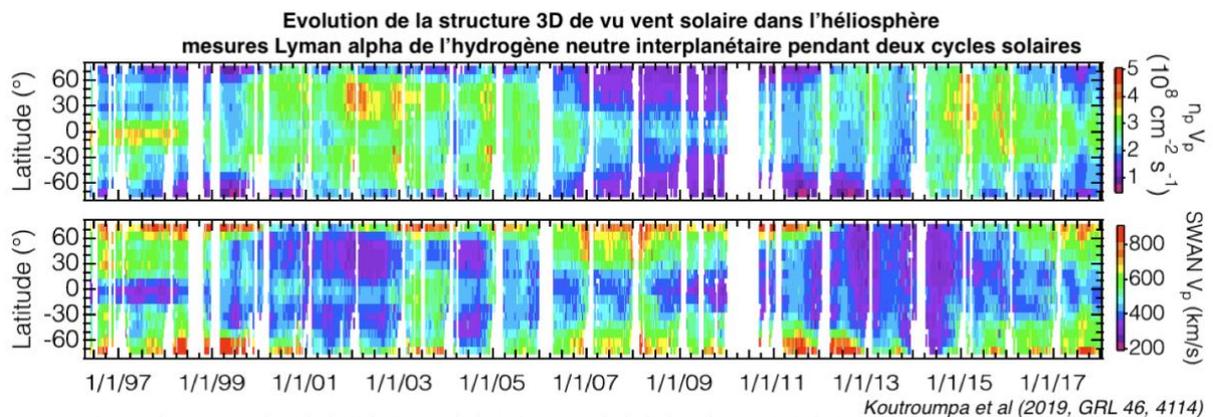
Les mécanismes à l'œuvre dans les environnements planétaires sont fondamentaux, mais leur étude à un niveau globale, systémique, mettant en jeu plusieurs milieux ou objets, et différents processus, constitue donc également un domaine d'étude fondamentale du PNST. C'est la mise en œuvre de ces connaissances, à travers nos théories, nos observations et nos modèles mis bout-à-bout, qui nous permettra d'arriver à une prévision fidèle des conditions dans l'environnement spatial, la thématique plus applicative de notre domaine décrite dans la section 1.4 : la météorologie de l'espace.

- **Quels sont les mécanismes locaux et globaux qui structurent l'héliosphère et son interaction avec le milieu interstellaire ?**

Bien que les données des sondes Voyager n'aient pas permis de les mesurer directement, l'ensemble des autres observations connues indiquent la présence d'une population dominante dans l'héliosphère externe, et dans l'héliogaine interne en particulier : les ions « pick-up ». Leur origine reste débattue, d'un point de vue quantitatif, entre photo-ionisation et échange de charge. Les travaux dans ce domaine utilisent un certain nombre d'observations, mais s'appuient aussi largement sur des efforts de modélisation afin de mieux comprendre à la fois les mécanismes eux-mêmes, et les interactions à plus grande échelle d'un côté avec le MIS (par exemple pour expliquer le « ribbon » observé dans les flux d'atomes énergétiques neutres provenant de ces régions éloignées), et de l'autre avec le vent solaire et sa variabilité intrinsèque (i.e., impact du cycle solaire, du flux UV, des CMEs, ou encore de la spirale de Parker et la couche de plasma héliosphérique sur le choc terminal, l'héliogaine et l'héliopause).

Un des processus étudiés en particulier au PNST est celui de l'échange de charge à ces frontières, qui affecte les instabilités d'interface et les mélanges des plasmas du MIS et de l'héliosphère. Un autre est celui du rôle du champ magnétique à grande échelle dans la déflexion des rayons cosmiques (et sa variabilité en fonction de l'activité solaire), ainsi que celui de la reconnexion magnétique à l'héliopause et de sa capacité à expliquer les changements spatiaux et temporels des flux de particules dans

l'environnement proche de l'héliopause. Concernant ce dernier point, il n'y a en effet pas encore consensus sur la nature de l'héliopause, et sur le fait de savoir si les sondes Voyager ont réellement atteint l'héliogaine externe ou même le MIS « vierge ».



En effet, ou enfin, une question majeure qui reste ouverte à l'heure actuelle concerne le simple fait de l'existence ou non d'un choc dans le MIS. Celui-ci séparerait le MIS « vierge » d'une héliogaine externe. Dans le cas contraire, d'une interaction subsonique, il devrait exister une zone de compression avec un gradient de pression plus graduel du MIS vers l'héliopause. Mais répondre à cette question semble hors de portée pour l'instant avec les données Voyager, motivant entre autre la soumission d'une proposition de mission spatiale interstellaire dans le cadre du « Decadal Survey for Solar et Space Physics » côté US.

L'étude de l'héliosphère externe requiert donc la combinaison de travaux reposant à la fois sur l'étude de mécanismes fondamentaux locaux (comme la reconnexion magnétique ou l'échange de charge) et sur des considérations ayant attiré à la formation et aux propriétés de structures à grande échelle, telles les structures du vent solaire, le choc terminal, la forme et la topologie magnétique de l'héliopause, ou encore la présence ou non d'un choc d'étrave dans l'interaction avec le MIS.

1.4. Par les applications sociétales avec la météorologie de l'espace :

Un quatrième axe vers lequel s'orientent les travaux du PNST est celui de la météorologie de l'espace. Le positionnement du PNST sur cet axe s'étend de la recherche fondamentale ayant pour but la compréhension des mécanismes physiques qui régissent les phénomènes eux-mêmes, jusqu'au développement d'outils et de services à valeur ajoutée qui peuvent être utilisés par des opérateurs et des prévisionnistes en météo de l'espace.

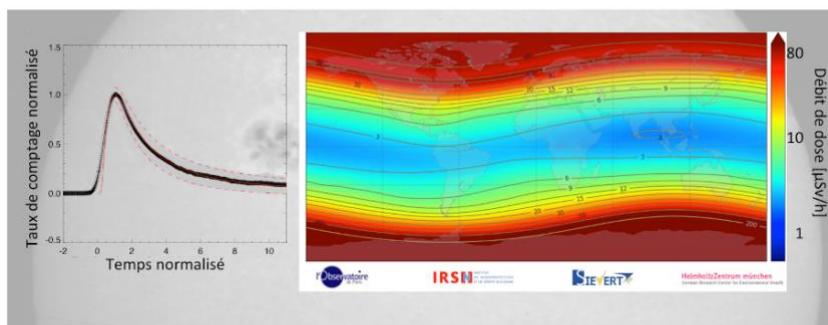
Le PNST note cependant un point de vigilance, avec le constat de la multiplication d'appels d'offres issus d'agences de financement pour l'héliophysique, mais qui sont pourtant exclusivement dédiés à la production d'applications et de livrables opérationnelles en météorologie de l'espace. Cette évolution des AO se fait, selon toute vraisemblance, aux dépens du financement de la recherche fondamentale et à bas TRL en amont. Cette tendance peut avoir des conséquences importantes sur l'évolution de la communauté PNST dans les années à venir, dans la mesure où l'impact se voit également dans les évolutions des profils des chercheurs, et les recrutements.

- **Comment prévoir le déclenchement et la propagation des éruptions, des éjections de masse coronales (CME), des particules énergétiques solaires (SEP), et des régions d'interactions en co-rotation (CIR) ?**

Les « flares » et CME, les SEP, et dans une moindre mesure les CIR, sont les principaux « drivers » de la météorologie de l'espace. A ce titre leur prévision fait l'objet d'une attention particulière. Il s'agit aussi bien de la prévision de leur formation au niveau (ou proche) du Soleil, que celle de leur arrivée à la Terre (et aux autres planètes), aussi bien en termes de timing que de paramètres physiques tels que le spectre en énergie des SEP et la direction du Bz interplanétaire pour les CME.

Plusieurs consortiums et projets de recherche ont déjà conduit à définir et à préciser des indicateurs observationnels qui permettent d'établir des alertes. Les CIRs sont probablement les mieux prédites avec la surveillance des trous coronaux en EUV et rayons X-mous. Mais leur structure globale reste mal quantifiée. Elle requiert en effet une très bonne connaissance de la structure

Musset, Klein, Fuller et al. 2023 JSWSC 13, 15



Un profil temporel normalisé de 23 événements solaires à particules relativistes – outil pour la prévision des durées d’alerte des bulletins de météorologie de l’espace

de la ligne neutre au niveau du Soleil, ce qui reste mal déterminé du point de vue observationnel, comme du point de vue de la modélisation. Concernant le déclenchement des flares et CMEs, on peut évoquer la longueur de la ligne d’inversion de polarité le long de laquelle le champ magnétique est non-potentiel, ou le taux de non-neutralisation des courants électriques à la surface solaire. Mais les prévisions associées ne sont toujours pas fiables à plus de 40-50%, et le moment de déclenchement échappe encore entièrement aux prévisions. En plus d’une meilleure compréhension de la physique de ces phénomènes, de nouveaux indicateurs doivent être développés, par exemple avec la mesure de l’hélicité magnétique, l’observation de l’historique des régions actives avant leur éruption, et des modélisations avec des degrés divers de sophistication pour leur transport du Soleil jusqu’à la Terre. Pour les SEPs, la localisation de la région source aux latitude et longitude dites connectées à la Terre par la spirale de Parker et l’intensité du flare restent les meilleurs indicateurs. Mais leur temps d’arrivée à la Terre demeure très mal prédit. La modélisation de l’accélération et du transport des particules n’en est qu’à ses débuts. La surveillance des SEPs, et des éruptions qui les produisent, restent donc encore à ce jour fondamentale pour la météorologie de l’espace.

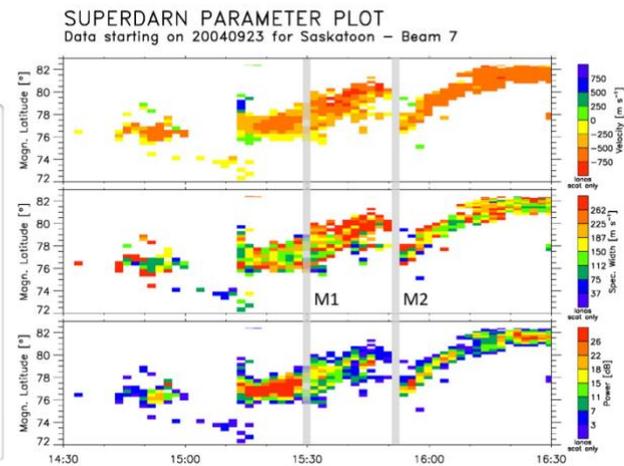
Plusieurs laboratoires du PNST travaillent à définir, tester, et préciser des indicateurs en météorologie de l’espace, ainsi qu’à développer, entretenir, et assurer le fonctionnement d’instruments de surveillance des phénomènes solaires, et aussi à développer et mettre à disposition des outils et service de prévision solaire souvent nourris par des recherches fondamentales en amont. Ces outils nécessitent le développement d’interfaces complexes entre différents modèles visant à décrire les diverses parties de la chaîne d’événements, du Soleil jusqu’à la Terre.

- **Quel est l’impact des perturbations solaires sur les activités géomagnétiques, atmosphériques, et humaines ?**

Sur le plan géomagnétique, l’impact des CIR et surtout des CME perturbe le champ magnétique terrestre, provoquant l’amplification du courant annulaire et des variations soudaines de l’intensité du champ magnétique à la surface terrestre, de plusieurs dizaines ou centaines de nT (voire plus de mille nT localement dans les cas extrêmes, soit 3% du champ géomagnétique). Les variations relatives peuvent cependant être beaucoup plus fortes loin de la Terre, notamment du côté nuit où les électrons accélérés par la reconnexion magnétique vont produire des aurores polaires.

Lorsqu’on les lie à l’effet plus rapide et direct des SEP (solar energetic particles), évoquées ci-dessus, toutes ces perturbations s’accompagnent d’un accroissement des radiations dans l’environnement spatial de la Terre. Ces radiations sont susceptibles d’affecter les satellites, mais également la santé des astronautes, et aussi de façon cumulée celle des personnels navigants des vols transpolaires.

Etude des asymétries Nord-Sud
des cornets polaires et des
réponses ionosphériques



Au niveau du sol sur Terre, les orages géomagnétiques peuvent aussi parfois engendrer des perturbations sur des infrastructures critiques telles que les réseaux électriques, essentiellement aux hautes latitudes, du fait de courants géo-magnétiquement induits par les variations soudaines du champ magnétique et la formation de courants ionosphériques intenses. Ce type d'événement est heureusement rare mais suscite naturellement une attention soutenue de la part de nombreux pays (USA, Canada, UK, et pays scandinaves en tête).

C'est aussi au niveau ionosphérique que la météorologie de l'espace attire beaucoup d'attention. Là, les rayons EUV et X provenant de l'activité solaire, les perturbations du champ géomagnétique, et l'impact des électrons accélérés dans la magnétosphère, peuvent chacun de manière spécifique induire des courants électriques, chauffer et ioniser le gaz, et altérer la densité et la composition des couches ionisées de l'atmosphère. Toutes ces perturbations affectent notamment la propagation des signaux radio et la communication avec les satellites. Les effets ionosphériques ont donc des répercussions importantes sur les opérations aériennes, maritimes et terrestres qui dépendent des satellites. C'est à ce titre que de nombreux organismes s'intéressent à la météorologie de l'espace en général, et à ses effets sur l'ionosphère en particulier.

Sur les différents sujets liés à l'impact terrestre et sociétal de la météorologie de l'espace, l'intérêt des différents acteurs du spatial est particulièrement focalisé sur l'état de l'ionosphère, qui est certainement un sujet parmi les plus importants pour la météorologie de l'espace, avec les SEP. Il y a un côté paradoxal à cette situation, compte-tenu de la quasi absence de recrutement sur cette thématique par le CNRS, le CNAP, et les Universités depuis 25 ans, et donc avec le risque de disparition de la recherche fondamentale en France sur cette thématique dans les UMR.

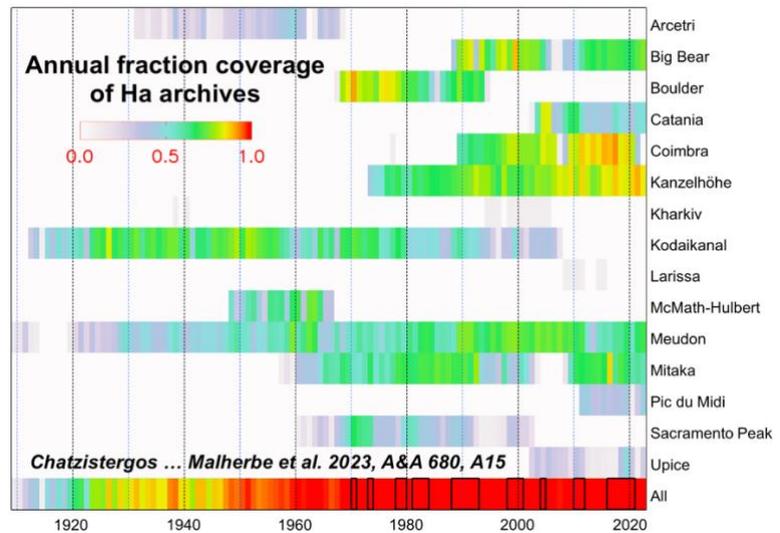
• **Quelles sont les évolutions à long terme qui régissent la climatologie de l'espace ?**

On parle souvent de météorologie de l'espace pour évoquer la surveillance et la prévision des perturbations actuelles de l'environnement spatial de la Terre. Une discipline moins connue mais tout aussi importante dans laquelle le PNST est investie est la climatologie de l'espace. Il s'agit de reconstruire l'activité solaire et ses conséquences sur Terre dans le passé, dans le futur, et sur de plus grandes échelles de temps.

Le premier objectif est de caractériser les variations à long terme qui se superposent au cycle d'activité de 11 ans. On peut citer par exemple le cycle de Gleissberg de 90 ans, qui est bien établi, ainsi que celui de Suess de 210 ans, beaucoup plus débattu. Le suivi des indicateurs de ces cycles à la surface du Soleil, notamment avec les filaments en Halph, et le cas échéant dans des marqueurs au niveau de la Terre dans les carottes de glaces et les cernes des arbres, permettent de mieux comprendre ces cycles, et de mieux contraindre la compréhension de la dynamo solaire à long terme.

Un second objectif tout aussi important est d'identifier et de quantifier les caractéristiques d'événements remarquables du passé qui pourraient préfigurer de tempêtes solaires extrêmes futures, ou bien les conditions dans lesquelles ils pourraient avoir lieu. On mentionne souvent le flare de Carrington de septembre 1859 mais il y en a bien d'autres. Notamment l'orage géomagnétique majeur de Mai 1921, l'événement à particules de février 1956, la plus grande tache solaire jamais observée en avril 1947, le flare le plus intense jamais observé depuis l'ère spatiale de novembre 2003, et les événements majeurs de 774 et 993.

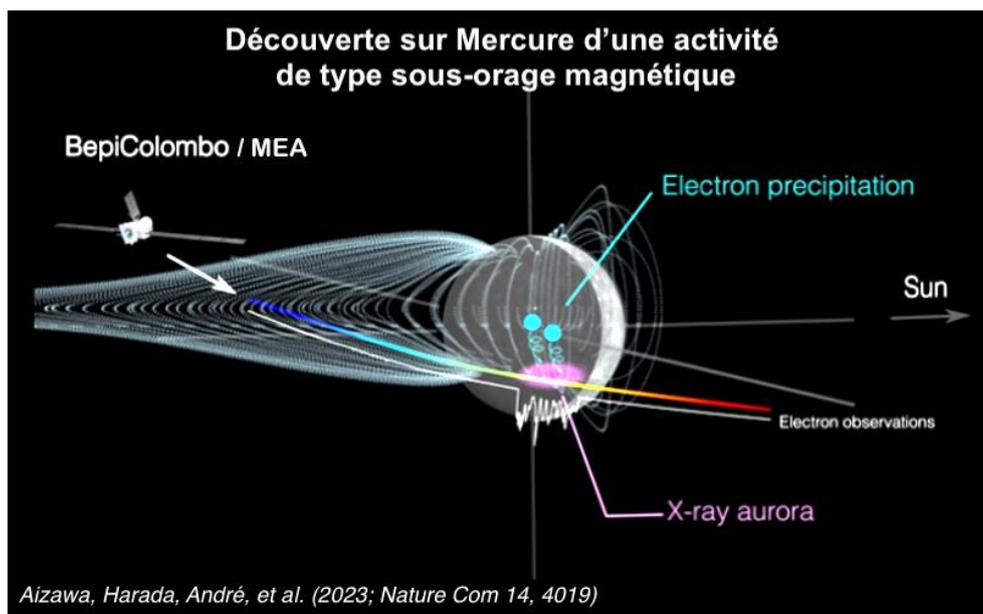
Le PNST est impliqué dans la recherche en climatologie de l'espace. Ces travaux se font dans le cadre de services d'observation pour la surveillance du système Soleil-Terre, en continue et sur des temps beaucoup plus longs que ceux de la durée de vie des autres instruments de recherche. D'autre part, le PNST effectue aussi des recherches avec les données historiques de ces instruments historiques.



2. Trois faits saillants sur la période 2019-2023

Ci-dessous trois faits saillants issus des travaux de la communauté sont mis en relief. Le premier concerne la thématique des **magnétosphères** et des **mesures in-situ**, le second celui du **Soleil** et de la **simulation numérique** dans le contexte de la **surveillance au sol**, et le troisième sur l'étude des processus et de la **physique fondamentale** des plasmas dans le contexte du **traitement des données spatiales**.

2.1. Découverte sur Mercure d'une activité de type sous-orage magnétique

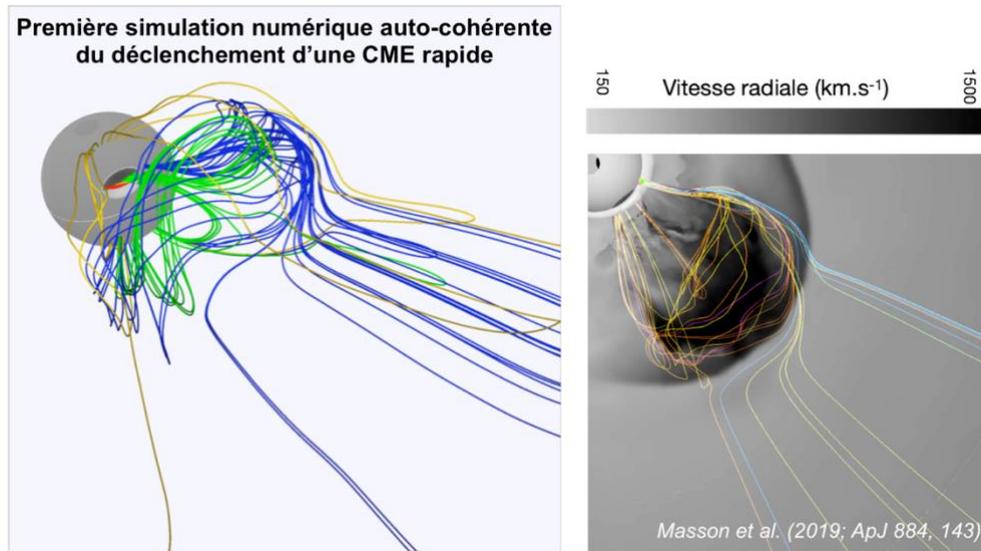


Les observations des analyseurs d'électrons à **Mercure** MEA ont mis en évidence lors du premier survol de Mercure par **BepiColombo** le 1er octobre 2021 des injections multiples et impulsives

d'électrons suprathermiques sur des lignes de champ magnétique fermées qui finissent par précipiter à la surface de Mercure, en relation avec le développement probable d'une activité de type sous orage magnétique, **comme on l'observe sur Terre lors d'événement de météorologie de l'espace**. Ces résultats soulignent que les injections d'électrons et la dérive magnétique dépendante de leur énergie constituent un mécanisme universel, désormais documenté dans l'ensemble du Système Solaire.

Crédits : **IRAP** – Aizawa, Harada, André, et al. (2023, *Nature Communications*)

2.2. Première simulation MHD auto-cohérente du déclenchement d'une CME rapide



Aucune simulation MHD précédente du déclenchement des **éruptions solaires** n'arrivait à produire de CME rapide, ce qui est **un enjeu pour la météorologie de l'espace**. En outre, le modèle standard en 3D des éruptions solaires ne prédisait de la reconnexion magnétique qu'en aval des CME, et donc des particules accélérées n'ayant a priori pas un accès direct au milieu interplanétaire. Une nouvelle **simulation numérique MHD** en 3D avec le code ARMS a permis d'obtenir la première simulation auto-cohérente d'une CME rapide dans une héliosphère stratifiée, structurée par un vent solaire isotherme, et impliquant un couplage entre le flux magnétique de la CME et l'héliosphère via la reconnexion magnétique. Ce couplage est essentiel puisqu'il prédit l'échappement des particules accélérées dans la nappe de courant à l'arrière de la CME. Ce modèle 3D met également en évidence l'extension spatiale du tube de flux reconnecté, permettant ainsi l'injection de faisceaux étendus de particules dans le champ interplanétaire, comme suggéré par les mesures sol du **radiohéliographe de Nançay** et spatiales de **STEREO**.

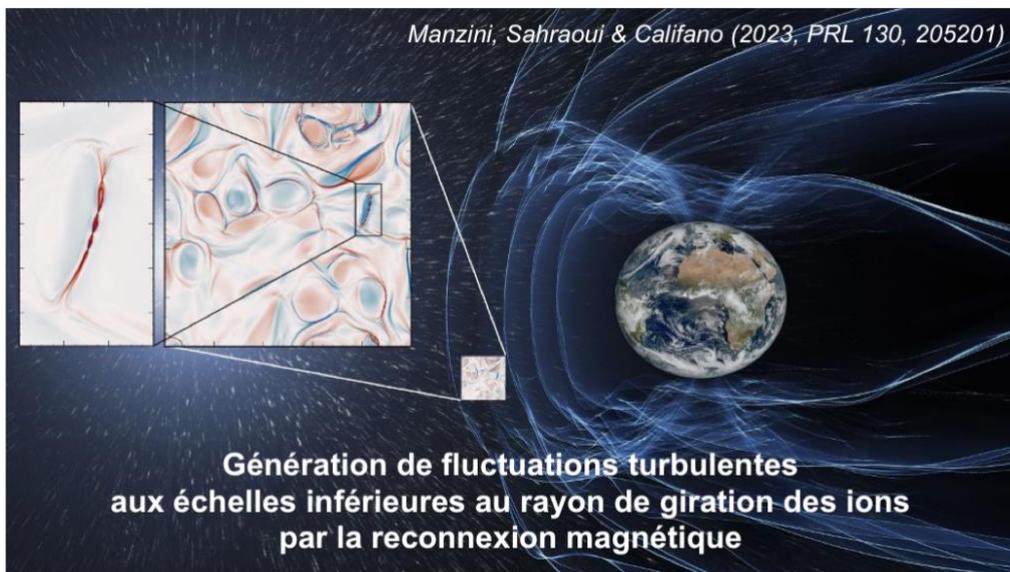
Crédits : **LESIA** – Masson et al. (2019, *Astrophysical Journal*)

2.3. Génération de fluctuations aux échelles sub-ioniques par la reconnexion magnétique

Grâce à la technique dite de coarse-graining basée sur le filtrage spatial échelle par échelle, il a été possible de calculer le transfert d'énergie turbulent à une échelle donnée et à chaque position dans l'espace, relaxant ainsi la contrainte des théories statistiques à la Kolmogorov qui nécessitent des moyennes (d'ensembles) sur de grandes portions de plasma. En appliquant cet outil aux données mesurées dans la **magnétogaine terrestre** par les 4 satellites de la mission magnétosphérique **MMS** de la NASA, une intensification des transferts d'énergie aux échelles sous-ioniques (plus petites que le rayon de giration des ions autour du champ magnétique 100 km) a été observée aux points de l'espace sièges de la reconnexion magnétique. Ce travail démontre que, et explique comment, la reconnexion magnétique peut générer les fluctuations turbulentes aux petites échelles. Ce nouveau mécanisme de transfert aux petites échelles pouvant être plus rapide que la cascade classique échelle par échelle, constitue un "raccourci" vers les petites échelles. Il peut ainsi potentiellement résoudre un paradoxe

soulevé par les observations faites dans diverses magnéto-gaines planétaires, à savoir l'omniprésence des fluctuations turbulentes à des échelles sous-ioniques même lorsqu'aucune cascade d'énergie n'est observée aux plus grandes échelles. Plus généralement ce travail ouvre de nouvelles voies pour étudier l'intrication entre la turbulence, la reconnexion et la **dissipation d'énergie dans les plasmas magnétisés sans collisions**.

Crédits : **LPP** – Manzini, Sahraoui & Califano (2023, *Physical Review Letters*)



3. Positionnement dans le contexte national et international

3.1 Les grands projets de la discipline, actuels et futurs

Les activités du PNST font usage de nombreuses ressources et infrastructures observationnelles. Nous déclinons ici les priorités du PNST selon leur nature de projet « sol » et « spatial ».

3.1.1. Projets au sol

En termes d'instrumentation sol, les priorités de notre communauté sont de trois types.

Les premières priorités constituent une liste pour l'essentiel stable par rapport à la précédente prospective, à savoir la surveillance radio à Nançay (**NRH** et **ORFEES** pour le Soleil ; **NDA** pour le Soleil et Jupiter), le télescope solaire **THEMIS (Canaries)**, la surveillance solaire avec le **Spectrohéliographe de Meudon** et **Meteospace**, et les observations ionosphériques de **SuperDARN** (Iles Kerguelen). On notera le retrait de **EISCAT** de cette liste, par rapport à la précédente prospective. C'est un choix raisonné qui a été fait par le CS, et qui a été adressé à la CSAA en 2020. Cette décision a été motivée par le constat de la taille et de la disponibilité de la communauté ionosphérique nationale.

La seconde priorité est issue d'un intérêt nouveau qui s'est exprimé pour la participation au futur European Solar Telescope (**EST**), notamment pour l'exploitation scientifique de ses données qui seront fournies par le télescope au format « science ready ». On notera que la communauté solaire n'est plus en capacité de fournir un PI pour une participation instrumentale à ce projet sol, mais qu'elle est néanmoins très intéressée par la science et à la coopération internationale autour de EST.

La troisième priorité concerne des instruments intéressants qui permettent aussi d'observer Jupiter et le Soleil sur campagne (e.g. **NenuFAR**). Ce type d'infrastructure n'est pas la priorité principale pour le PNST car le temps d'observation dédié à nos thématiques est moindre, mais le PNST reste très intéressé par leur exploitation qui permet d'en tirer des publications avec des résultats originaux.

3.1.2. Projets spatiaux

Dans le volet des missions spatiales, celles dont l'exploitation a été une priorité pour notre communauté lors de ces dernières années sont **SoHO**, **Cluster**, **STEREO**, **SWARM**, **THEMIS (NASA)**, **SDO**, **MAVEN**, **MMS**, **Juno**, **Parker Solar Probe**, **Bepi Colombo** et **Solar Orbiter**, en premier lieu, et plus récemment **JUICE**. D'autres missions internationales sont régulièrement utilisées par la communauté. Elles ont fait, en comparaison, l'objet de moins d'activité au cours de la période 2019-2024.

Depuis la dernière prospective, certaines priorités affichées ont pu s'affirmer ou se réaliser en partie, et d'autres sont apparues. Le CNES s'est engagé sur la contribution française aux phases BCDE1 de la mission **Comet Interceptor** de l'ESA (lancement 2029), dédiée à l'exploration d'une comète primitive. Les discussions ont bien avancé concernant une contribution de la France au spectroscope EUV de la mission **SOLAR C** (lancement 2028). Cette mission étudiera la dynamique de l'atmosphère solaire à très haute résolution, mais elle doit encore être définitivement engagée par la JAXA. La mission **HelioSwarm**, permettant des mesures multi échelles (fluides et ioniques) simultanées avec une constellation de 9 satellites, a été sélectionnée par la NASA pour un lancement en 2029. La France y contribuera fortement en fournissant 2 des 4 instruments. Enfin, la phase 0 SPEED réalisée au CNES avec l'aide du PASO a permis de préciser les besoins et les étapes à entreprendre afin de réaliser un nano satellite optimisé pour la mesure des plasmas spatiaux,

Les nouvelles priorités majeures de la communauté apparues depuis la dernière prospective sont, dans un premier temps, les missions **Plasma Observatory** (processus d'accélération dans les plasmas héliosphériques) et **M-Matisse** (études multipoint de l'environnement martien), actuellement en phase A de l'appel à mission M7 (« medium class ») du programme scientifique de l'ESA. La mission **VIGIL**, avec une contribution française probable à l'imageur UV, est également une priorité. Elle a pour but la mise en place d'une surveillance en météorologie de l'espace au point de Lagrange L5, dans le cadre du programme optionnel S2P de l'ESA.

La **mission flagship du « Decadal Survey » de planétologie des US** sera dédiée à l'**exploration d'Uranus**, et constitue naturellement une des priorités de notre communauté à moyen terme. De la même manière, qu'il s'agisse d'une mission solaire, magnétosphérique **ou d'exploration de l'héliosphère externe**, la mission flagship qui sera sélectionnée lors du « **Decadal Survey for Solar et Space Physics** » de cette année aux US sera naturellement une priorité de la communauté PNST.

Bien qu'il n'y ait pas de nouveau cadre programmatique à l'échelle nationale, les thématiques scientifiques liées à la dynamique de la magnétosphère interne, ainsi qu'aux interactions entre les différentes enveloppes terrestres (ionosphère, mésosphères, etc.) restent une des priorités de la communauté. Elles font l'objet de plusieurs études instrumentales auxquelles impliquant des équipes du PNST, avec au moins trois projets liés à des programmes spécifiques de l'ESA (comme **NanoMagSat**), et un de la NASA.

3.2 Activités du PNST aux interfaces

Le PNST a de nombreuses interfaces avec différentes communautés scientifiques, structures organisationnelles, et organismes. Ces interfaces peuvent être regroupées en quatre grandes familles. Celles liées à la physique des plasmas en général. Celles qui concernent l'exploration du système solaire au sens large. Celles avec l'étude des étoiles et leur environnement proche. Et bien sûr celles avec les opérations en météorologie de l'espace.

3.2.1. Physique des plasmas

La communauté PNST étudie la physique fondamentale des plasmas dans les conditions physiques variées. Ce sont celles que l'on peut trouver dans l'héliosphère, depuis l'intérieur du Soleil jusqu'à la frontière avec le milieu interstellaire. D'une part, cette variété de régimes physiques permet de transposer certaines connaissances et méthodologies à d'autres plasmas, y compris de laboratoire ou

d'objets astrophysiques lointains. D'autre part, les objets étudiés dans l'héliosphère ont des interfaces physiques perméables aux transferts de matière et d'énergie qui constituent des interfaces thématiques naturelles.

C'est ainsi que le PNST s'intéresse à certains aspects de la physique atmosphérique, de par l'étude qu'il fait lui-même des phénomènes électriques de la haute atmosphère comme les « transient luminous events ». Cette interface est de fait avec la section **INSU-OA**.

Dans un autre registre, des équipes du PNST collaborent avec des équipes expérimentales de physique de plasmas de haute énergie pour l'étude de la turbulence, du confinement magnétique du plasma, de l'accélération et du chauffage par des chocs radiatifs et par de la reconnexion, qui peuvent être induits par des lasers de puissance. Ces interfaces impliquent l'**INSIS** et l'**INP**.

Pour finir, les équipes du PNST interagissent aussi fréquemment avec d'autres disciplines de l'astrophysique, donc le reste de l'**INSU-AA**, notamment sur les questions méthodologiques de CFD (computational fluid dynamics) et sur des sujets thématiques comme la reconnexion magnétique, les pulsars et les rayons cosmiques avec le **PNHE**.

C'est autour de tous ces sujets qu'on peut citer le succès d'opérations (colloques, collaborations) issues d'initiatives en physique des plasmas, au niveau national avec la **SFP-Bureau Plasma**, et au niveau régional comme avec **Plas@Par**, qui fut un LabEx et qui est à présent une fédération de laboratoires, et qui permettent tous les deux un rapprochement sans précédent des équipes autour de toutes ces thématiques.

3.2.2. Exploration du système solaire et de ses confins

La composante planétaire du PNST a pour objectif l'étude des magnétosphères, des exosphères et des environnements ionisés des autres planètes du système solaire, de leurs lunes, et même des comètes. Pour ce faire, elle est positionnée sur la grande majorité des missions spatiales pour l'exploration des planètes du système solaire, passées, présentes et à venir. Elle interagit donc régulièrement avec les planétologues du monde entier, et donc en France avec le **PNP**. Le lien est tellement fort qu'il est traditionnel de partager un membre du CS entre les deux PN.

Une partie des équipes du PNST s'intéressant aussi à la physique des frontières et des régions externes de l'héliosphère, un lien avec la physique du milieu interstellaire implique aussi une interface avec le **PCMI**. Bien que la communauté française soit de taille limitée, un fort regain d'intérêt pour l'héliosphère externe a eu lieu avec la traversée supposée de l'héliopause par les satellites Voyager au cours de la décennie passée. Enfin, la sélection éventuelle d'une mission « interstellaire » coté US (proposée dans le cadre du Décadal Survey) aurait sans aucun doute la capacité de rapprocher les communautés PNST et PCMI dans le futur.

3.2.3. Physique des étoiles et de leur environnement

Le Soleil est une étoile !

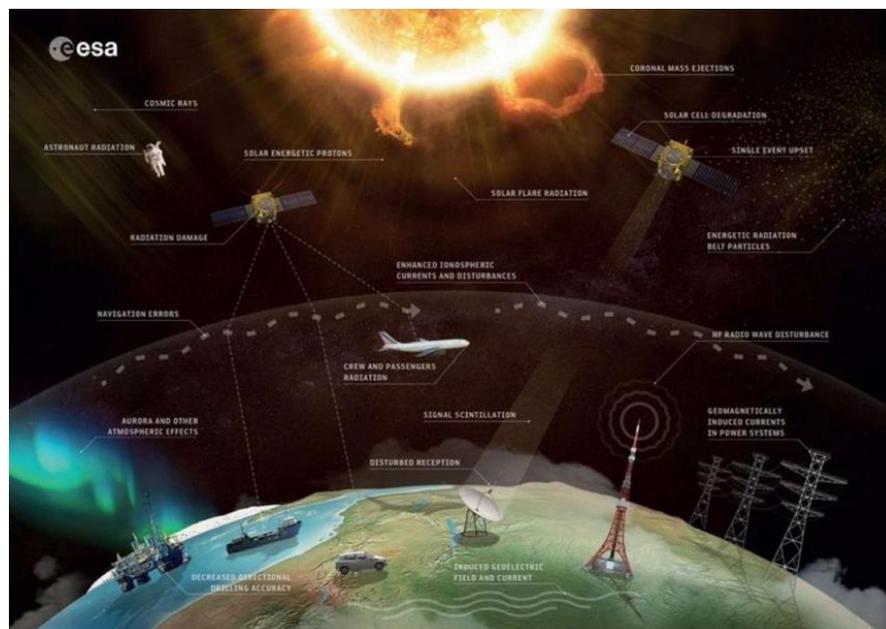
Au-delà de cette évidence, les équipes du PNST qui travaillent sur la dynamo et sur l'origine de l'activité du magnétisme à l'intérieur du Soleil interagissent naturellement avec les physiciens solaires qui étudient l'intérieur du Soleil d'un point de vue hélio-sismologique pour la compréhension de la structure interne de notre étoile, jusqu'à son cœur nucléaire. Ces activités ne font historiquement pas partie du PNST, mais plutôt du **PNPS**.

Naturellement, des collaborations existent aussi avec les équipes qui travaillent sur l'évolution stellaire, et les comparaisons se font non seulement avec les jumeaux solaires, mais aussi les étoiles différentes dans lesquelles l'activité peut être très différente, selon la localisation de la zone convective, le couplage avec un disque d'accrétion, et la vitesse de rotation. Il s'agit alors de comprendre la dynamo stellaire au sens large, mais aussi les éruptions stellaires, avec les conditions d'existence de super-éruptions.

Plus récemment, des ouvertures thématiques ont été faites vers l'études des magnétosphères des exoplanètes, et de leur couplage avec les vents stellaires, notamment dans le cadre de l'étude de leur habitabilité.

Tous ces travaux faits par les équipes du PNST sont à l'interface avec le **PNPS**, avec lequel un membre du CS est aussi partagé. Les questions liées aux interactions étoiles-exoplanètes partagent des interfaces à la fois avec le **PNPS** et le **PNP**.

3.2.4. Météorologie de l'espace



De par son activité de recherche et de service dans des SNO, la communauté PNST est typiquement positionnée dans la gamme des TRL bas à moyen niveau pour ce qui est de l'applicabilité directe des concepts, des connaissances, et des outils, dans des services de prévision opérationnels en météorologie de l'espace. La communauté PNST se distingue donc du métier de prévisionniste en météorologie de l'espace, qui est lui généralement assuré par les agences (ESA en Europe, NOAA aux USA, etc.), au même titre que les chercheurs en physique de l'atmosphère à l'INSU-OA se distinguent des ingénieurs de Météo-France. Par la même analogie avec la météorologie atmosphérique, on comprend que la communauté PNST a des interactions fortes avec les acteurs des applications opérationnelles en météorologie de l'espace.

D'une part, et de façon spécifique, les chercheurs et ingénieurs du PNST de certains instituts ont de fortes interfaces, y compris en interne, avec les applications en météorologie de l'espace sur la magnétosphère interne et l'ionosphère. C'est le cas notamment de l'ONERA et du CEA DAM. C'est aussi le cas des équipes qui travaillent sur le géomagnétisme et le paléomagnétisme, qui sont à la fois du côté de la géophysique interne, et donc de la section **INSU-TS**, et de l'établissement d'indices géomagnétiques utilisés en météorologie de l'espace.

D'autre part, une partie de la communauté PNST est impliquée dans le fonctionnement et les appels d'offre de plusieurs organismes qui financent et organisent les efforts autour des applications pour la météorologie de l'espace. Au niveau national, il faut mentionner l'**OFRAME** (Organisation Française pour la Recherche Appliquée en Météorologie de l'Espace) qui a été mise en place par l'**INSU** pour coordonner et informer la communauté PNST des opportunités et des AO en météorologie de l'espace. Il y a aussi le groupe **GCME** (Groupe de Coordination en Météorologie de l'Espace) du **CNES** qui suit notamment l'intérêt des entreprises et organismes de l'aéronautique et du spatial, et auquel participent des membres du PNST. La communauté PNST interagit aussi avec la **DGA** qui finance des actions à TRL moyen et haut.

A l'échelle européenne, le programme **S2P** (Space Safety Programme, qui succède au **SSA** Space Situational Awareness) de l'**ESA** finance le développement d'outils opérationnels à haut TRL, et

le programme **Horizon Europe** finance des recherches à TRL moyen avec des livrables qui doivent être opérationnels. Un fait intéressant sur la période 2019-2023 a été la création de l'organisation **E-SWAN** (European Space Weather and Space Climate Association), qui fédère les communautés scientifiques à l'échelle européenne. Il faut noter, d'ailleurs, le rôle moteur de la communauté française dans la fondation d'**E-SWAN**, ainsi que dans la création de la revue **JWSC** (Journal of Space Weather and Space Climate) et de la conférence récurrente **ESSW** (European Space Weather Week); la dernière ayant été organisée avec grand succès en France, à Toulouse, en Novembre 2023.

3.3 Forces et difficultés à l'international

- *Forces à l'international :*

La communauté nationale a de nombreux atouts sur la scène internationale. Cette excellente reconnaissance internationale fait que de très nombreuses équipes du PNST sont très souvent sollicitées pour collaborer sur des projets instrumentaux et sur des collaborations de recherche.

- Une force non-négligeable est **le caractère unifié du PNST**. Toutes les thématiques parfois réunies sous le nom « héliophysique » sont étudiées en France. De plus, la communauté PNST est très soudée autour de la physique des plasmas et de l'approche système, mentionnées au début de ce document.

L'**approche scientifique est dé-silotée**, ce qui est très bien illustré par les programmes des sessions scientifiques des colloques du PNST, et ce **malgré les différences entre objets étudiés** (par ex. de la photosphère solaire à la magnétosphère de Jupiter), **entre régimes physiques** des plasmas qu'on y trouve (par ex. collisionnel ou non), et **entre méthodes d'observations** (par ex. in-situ vs. remote sensing).

Cette unité du PNST est à mettre au crédit des directions et des conseils scientifiques du programme des années passées, qui ont su regrouper plusieurs GdR ayant des cultures différentes, et qui ont non seulement réussi à faire communauté, mais aussi à créer des liens forts et durables entre des communautés qui sont différentes, à l'international.

C'est quelque chose qu'on ne trouve que très rarement dans d'autres pays à cette échelle de toute l'héliophysique. C'est donc une originalité et une force de la communauté française.

- Une autre force majeure de la communauté nationale est l'existence de plusieurs **filères technologiques et instrumentales** d'excellence. On peut citer notamment l'instrumentation UV, les antennes radios, les magnétomètres et les spectromètres de particules.

Ces filières permettent aux équipes françaises d'être sélectionnées sur une grande partie des missions de la discipline, qu'elles soient européennes ou pas.

Cette reconnaissance instrumentale est une force que la communauté a pu construire grâce à la présence du CNES, qui soutient notre communauté depuis toujours et constitue une puissance sous-jacente indéniable vis-à-vis de nos propositions de contribution à l'international (e.g., accords bilatéraux sur des missions NASA ou JAXA).

- Le complément de la force précédente est la réputation de la communauté française PNST pour son **approche très physique** dans l'analyse des simulations numériques et des observations, ou dans l'élaboration de nouvelles théories. En effet, l'« école française » met un point d'orgue à comprendre les processus physiques à partir des quantités mesurables, soit en les confrontant à des théories existantes, soit en les utilisant comme support pour développer de nouvelles théories.

Cette approche de physique fondamentale n'est bien sûr exclusive ni au PNST ni à la France. Mais elle ne constitue pas non plus l'approche la plus répandue parmi tous nos collègues dans le monde. Il sera important d'être vigilant à la continuité de cette force, d'autant que les AO se multiplient pour le développement d'applications pour la météorologie de l'espace, aux dépens des AO pour la recherche plus en amont dans plusieurs pays et en Europe.

- La dernière force à mentionner vis-à-vis de l'international est un corolaire des forces ci-dessus, à savoir que la communauté PNST est globalement **très bien insérée au niveau international**. Elle a une présence forte dans les consortiums de projets collaboratifs et d'instruments au sol et dans l'espace. Elle est bien visible dans les grands colloques et les plus petits workshops. Elle a de nombreuses collaborations bilatérales, pas forcément formalisées, mais très visibles dans les publications. Elle n'a pas de difficulté à placer ses doctorants en post-doc, et est fréquemment sollicitée par des candidats pour des contrats postdoctoraux ou des postes permanents.

- **Difficultés vis-à-vis de l'international :**

On peut identifier deux faiblesses de la communauté nationale vis-à-vis de la situation internationale. Elles constituent des points de vigilance sur lesquels il va falloir travailler dans les années à venir.

- L'« école française » est reconnue mais malheureusement victime de son succès, avec un **brain drain** non-négligeable vers l'étranger. Si d'une part cet aspect contribue à tisser des liens avec des laboratoires étrangers, d'autre part cela affaiblit la communauté française.
- L'implication dans **l'instrumentation sol est en fort déclin** depuis une quinzaine d'années au PNST. C'est vrai aussi bien pour la discipline solaire que la discipline ionosphérique.

En **physique solaire**, cela a conduit à plusieurs difficultés de THEMIS et à un retard du positionnement de la communauté française dans le projet European Solar Telescope. Ce positionnement favorable pour EST s'est néanmoins résolument manifesté lors du colloque de prospective du PNST en janvier 2024 par l'intérêt de la communauté solaire dans son ensemble pour l'exploitation scientifique des données issues du télescope.

En **physique ionosphérique**, cette situation a même conduit le CS du PNST en 2020 à ne pas recommander à la CSAA de poursuivre le soutien financier pour une participation de la France au consortium EISCAT en qualité d'affilié, tout en rappelant à l'INSU que l'étude et la surveillance de l'ionosphère demeure un des enjeux majeurs au développement de la météorologie de l'espace, du fait de son rôle dans la perturbation des communications entre les satellites et le sol.

Dans les deux cas, cette situation est due à l'état des ressources humaines dans ces spécialités en France, résultant de très peu de recrutements.

4. Thématiques scientifiques, bilan et avenir

4.1 Thématiques fortes :

Le conseil scientifique du PNST a choisi de mettre en relief cinq thématiques scientifiques dans lesquelles la communauté nationale est particulièrement forte.

Ces forces ont été choisies en considérant plusieurs critères, tous n'étant pas satisfaits pour chacune des forces, mais plusieurs l'étant. Avant tout, la production et l'impact scientifique. Aussi, la reconnaissance internationale des chercheurs. De plus, la taille de la communauté dans cette thématique et sa capacité à se mobiliser dans des grands projets d'instruments ou de services. Et finalement l'obtention régulière de contrats de recherche ANR et Horizon-Europe.

Ces 5 forces thématiques sont listées ci-dessous, dans un ordre radial depuis le centre du Soleil vers l'extérieur du système solaire.

- La **dynamo solaire** et **stellaire** :

Les équipes du PNST sont parmi les premières et encore aujourd'hui les très rares au monde qui ont la compétence pour faire des simulations numériques MHD globales de la

dynamo des étoiles en général, et du Soleil en particulier. Grâce à cette compétence, elles sont à la pointe des débats sur l'origine de la dynamo dans la tachocline ou dans la zone convective, sur l'origine de la rotation différentielle, et sur le convective conundrum. Elles ont été les premières à expliquer en quoi la dynamo du Soleil n'était pas un cas particulier dans des études stellaires statistiques, qui s'avéraient être biaisées.

- Les **éruptions solaires** et l'**accélération** du **vent solaire** :

La physique de la couronne solaire est devenue une spécialité du PNST depuis les années 1990, après des années de physique solaire française dominée par l'étude observationnelle au sol des couches proches de sa surface. La communauté française est particulièrement reconnue pour ses travaux sur la modélisation MHD du déclenchement et du développement des phénomènes éruptifs (flares, jets, et CMEs), et pour les diagnostics sur les particules accélérées lors de ces phénomènes (X et radio). Elle a aussi une expertise très importante dans la physique de l'accélération du vent solaire, aussi bien par la simulation exosphérique et MHD, que par les diagnostics EUV et in-situ. Enfin, aidé par les besoins de météorologie de l'espace, la France a développé une forte expertise dans l'étude (théorie, simulations, observations) de la propagation du vent solaire et de ses perturbations, ainsi que des processus clés qui y sont associés (chocs, reconnexion magnétique, turbulence).

- La **turbulence** dans le **vent solaire** et dans la **magnétosphère** :

La turbulence est un axe fort de la recherche du PNST. Plusieurs laboratoires étudient la turbulence dans les plasmas de l'héliosphère, en combinant toutes les approches : théorie analytique, simulation numérique, dans plusieurs régimes physiques, mesures in-situ, dans le vent solaire, dans les magnétogaines ou les magnétosphères. Cette diversité d'approches nourrit des débats de fond sur la nature même de la turbulence au sein de la communauté nationale, que l'on retrouve dans les colloques internationaux de la discipline. La communauté française est notamment reconnue pour ses travaux sur l'identification des mécanismes responsables des différentes ruptures de pente dans l'espace des fréquences, et des structures (ondes et vortex d'Alfvén) dans l'espace physique caractéristiques de la turbulence.

- L'**interaction vent solaire – magnétosphère** :

Cette thématique regroupe une grande partie de la communauté nationale répartie sur de nombreux laboratoires du PNST. Plusieurs manifestations de cette interaction systémique sont étudiées et font l'objet de plusieurs missions spatiales. On peut citer la reconnexion magnétique, essentiellement étudiée en France du côté jour au niveau de la magnétopause avec des approches numériques hybride et/ou PIC, analyse de données in-situ, et machine learning. Les ceintures de radiation sont aussi une force de la communauté, avec des mesures in-situ complétées de modèles innovants où la physique est semi-paramétrée afin de pouvoir réaliser des calculs autrement impossibles à faire. Concernant les phénomènes dynamiques du côté nuit, l'école française a développé des approches originales pour la mesure et la modélisation des fronts de dipolarisation, qui permettent d'expliquer nombre d'observables dont le modèle standard international des sous-orages ne rend pas compte. Enfin, malgré son déclin, il perdure une forte expertise en observation et modélisation, en particulier, de l'ionosphère terrestre, avec un intérêt fort pour comprendre les variations brutales de ses propriétés au cours des orages géomagnétiques.

- Les **magnétosphères planétaires et comètes** :

La communauté qui étudie les environnements spatiaux des planètes du système solaire est progressivement devenue une composante majeure du PNST depuis une quinzaine d'années, avec la sélection des équipes françaises sur la plupart des missions spatiales internationales, doublée du développement d'instruments sol et de nombreux recrutements. La force du PNST est d'être présent sur l'étude de toutes les planètes auxquelles une ou plusieurs missions sont

dédiées. Ce positionnement est donc une opportunité pour tout le PNST, qui permet de voir des magnétosphères très différentes de celles de Terre, et d'en comparer les propriétés, et même d'en projeter les résultats vers les exoplanètes magnétisées. Au-delà des planètes et de leurs lunes, la communauté du PNST est également très impliquée (science et instrumentation) dans les sciences cométaires, en particulier de par son implication dans les missions spatiales passées, mais aussi à venir.

4.2 Thématiques en difficulté :

Quelques thématiques scientifiques se sont graduellement affaiblies au PNST au cours des vingt dernières années. Ces affaiblissements s'expliquent en partie avec les départs à la retraite des spécialistes, et le recrutement de jeunes chercheurs qui ont fait évoluer le PNST vers d'autres spécialités. Mais ils sont aussi beaucoup dus à l'absence de recrutement de candidats qui étaient bien existants dans ces thématiques. Et ils se sont aggravés avec une crise de recrutement au PNST pendant 8 ans entre 2013 et 2020 (voir section 7.3.), crise dont le PNST n'est pas encore sorti en 2024.

- La physique de la « **surface solaire** » :

L'étude de la photosphère et de la chromosphère solaire a été le sujet phare, voire ciblé, de la physique solaire française du XX^e siècle. La communauté était alors très axée sur l'instrumentation optique, et sur la spectro-polarimétrie. C'est ce positionnement qui a motivé la création du télescope THEMIS au Canaries. Le volet méthodologique de cette thématique s'est à présent totalement éteint en France, bien qu'il reste très présent dans d'autres pays, notamment en Europe, avec les équipes instrumentales du projet European Solar Telescope (EST). La prise en compte du couplage des différentes couches de l'atmosphère solaire pour la compréhension du chauffage coronal, et celle des éruptions, a suscité un regain d'intérêt vers l'analyse des observations de ces régions du Soleil. Mais il n'en demeure pas moins que la compétence instrumentale et spectro-polarimétrique n'existe plus parmi les chercheurs encore en poste non-retraités.

- La physique des **chocs non-collisionnels** dans l'héliosphère :

Les chocs dans les plasmas sans collisions sont une composante majeure des études de systèmes dans l'héliosphère, qu'il s'agisse des chocs de CME interplanétaires, des Corotating Interaction Regions (CIR) dans le vent solaire, des chocs d'étrave en amont des magnétosphères planétaires, et du choc terminal de l'héliosphère. Les chercheurs du PNST qui étudient la physique de ces phénomènes dans ces conditions si particulières, bien différentes des chocs hydrodynamiques « habituels », avec toute la physique des pré-chocs, des ondes de Langmuir, et des particules accélérées. Ils sont malheureusement très peu nombreux aujourd'hui.

- La **physique ionosphérique** :

Les activités en physique ionosphérique ont connu un fort recul ces dernières années. Les raisons sont complexes et multi factorielles, mais sont apparemment spécifiques à la France et plus précisément internes à la communauté, puisque la recherche ionosphérique ne se porte pas aussi mal ailleurs. En premier lieu, on assiste à une érosion de ses effectifs sur ces vingt dernières années, puisqu'aucun recrutement n'a été réalisé sur la thématique ionosphère après 2006 au CNRS, au CNAP, ou dans les universités, hormis un à l'IPGP, mais avec comme thématique principale la Terre solide. Ensuite, les développements de la Météorologie de l'Espace entraînent un redéploiement des activités vers des développements plus applicatifs dans des organismes comme l'ONERA ou le CEA-DAM. Cette situation contraste avec les sollicitations que reçoivent les équipes françaises pour leur expertise en physico-chimie du milieu ionosphérique et sa modélisation numérique. Elles sont également fortement impliquées dans diverses instrumentations de surveillance au sol de la réponse ionosphérique aux éruptions solaires (dont radar SuperDARN et récepteurs VLF), couplées si besoin aux mesures satellitaires disponibles. Côté spatial, malgré l'échec du lancement de la mission TARANIS, on peut

également noter la forte implication de la France dans des projets, tels que Aurora Monitoring Mission et NanoSatMag des programmes D3S et FutureEO de l'ESA.

- L'**héliosphère externe** :

La caractérisation de l'héliosphère externe et de son interaction avec le milieu interstellaire a toujours constitué une composante du PNST. La communauté française dans ce domaine a toujours été de petite taille, mais a été suffisamment dynamique pour être positionnée sur l'instrument SWAN de la mission SoHO, et pour assurer quelques recrutements. Ces derniers sont malheureusement trop peu nombreux, et la communauté attachée à cette thématique à l'interface entre le PNST et l'astrophysique est en masse sous-critique.

4.3 Thématiques émergentes :

Plusieurs thèmes de recherche nouveaux se développent dans les équipes du PNST depuis quelques années.

Nous aurions pu faire ici le choix de mettre en valeur des sujets émergents *dans le cœur* des sujets du programme. Il y en a plusieurs ! Ils sont, en fait, tous associés à des questions scientifiques qui se précisent autour des processus de physique fondamentale. On peut évoquer par exemple le rôle de **l'hélicité magnétique dans les éruptions solaires**, ou des phénomènes nouvellement observés comme, par exemple, **les switchbacks dans le vent solaire**. On peut aussi développer un autre exemple. A ce jour, **plus personne ne pose la « simple » question de résoudre « le chauffage coronal »**. Par contre les questions qui se posent sont : comment caractériser le rôle des chocs et de la reconnexion magnétique pour chauffer la chromosphère ; comment et où se forment les nappes de courant qui dissipent l'énergie dans la couronne et le vent solaire ; quel est le rôle de l'instabilité thermique dans le cycle des boucles coronales ; ou encore quelle est la nature de la cascade turbulente dans les plasmas magnétosphériques et le vent solaire ? L'origine de la dissipation liée à la turbulence, spécifiquement à l'échelle ionique, est par exemple la question centrale que la mission HelioSwarm, récemment sélectionnée pour un lancement en 2029, ciblera. Le côté « émergent » dans ce cas n'est pas à proprement parler la question scientifique, mais plus l'approche technologique et méthodologique, faisant appel à un essaim de satellites.

Ci-après nous avons fait le choix de **mettre en relief des thématiques émergentes aux interfaces du programme** qui illustrent le dialogue entre la communauté PNST et les autres disciplines de la physique des plasmas astrophysiques, et dans d'autres environnements (voir Section 3.2.).

- Activité magnétique et éruptions **stellaires** :

Les expertises conjointes en physique stellaire avec la technique de Zeeman Doppler Imaging, sur les dynamos solaire et stellaires et sur les éruptions solaires, font conjointement émerger un sujet d'étude sur la caractérisation et la physique des éruptions stellaires.

Ce sujet de physique stellaire intéresse le PNST, car il permet aussi de faire de la physique stellaire comparée, et d'étudier les conditions rarement atteintes sur le Soleil dans lesquelles les événements extrêmes de type super-éruptions pourraient avoir lieu sur le Soleil.

- Magnétosphères **exo-planétaires** :

La plupart des planètes du système solaire ayant des magnétosphères (qu'elles soient propres ou induites), il est naturel de considérer que nombre d'exoplanètes doivent aussi en être dotées. La proximité de plusieurs d'entre-elles avec leur étoile permet de considérer des relations entre le vent stellaire et la planète dans des conditions parfois très différentes du système solaire, mais qui pour autant n'excluent pas d'utiliser les connaissances et méthodologies acquises au PNST pour tenter de comprendre le rôle des magnétosphères sur l'habitabilité des exoplanètes. Ce sujet constitue un thème émergent impliquant plusieurs équipes du PNST.

- **Applications opérationnelles en météorologie de l'espace :**

De nombreux appels d'offres (AO) sont très incitatifs pour que les chercheurs développent des outils et des applications à visée opérationnelle dans le cadre de la météorologie de l'espace. Ils sont essentiellement émis par l'ESA avec son programme S2P, par l'Union Européenne dans le cadre des appels Horizon-Europe, et au niveau national par le partenariat DGA-ANR avec les programmes MATHILDE et ASTRID. L'OFRAME issue de l'INSU (voir section 3.2.4) a pour mission d'effectuer une veille sur ces AO et d'informer et de coordonner les réponses de la communauté.

Depuis quelques années, et à l'image de ce qui se passe dans quelques autres pays, notamment la Belgique, le Royaume Uni, et les USA, plusieurs équipes françaises se sont saisies de ces opportunités. Elles effectuent dans ce cadre des recherches plus appliquées que ne le sont celles faites plus traditionnellement dans les laboratoires. Le PNST considère ces activités émergentes comme faisant partie intégrante du périmètre du PNST, et à ce titre le PNST souhaite qu'elles soient reconnues comme telles par les instances de recrutement et d'évaluation nationales.

Un point d'alerte doit cependant être mentionné. Si d'une part les AO pour les applications en météorologie de l'espace se sont multipliées, d'autre part cette croissance s'est faite aux dépens des AO moins ciblés sur les applications et plus ouverts à la recherche pour la compréhension des processus physiques. Or notre discipline n'est pas mûre pour se transformer intégralement en prévisionniste : on ne sait toujours pas comment se déclenche une éruption solaire, ni pourquoi le vent solaire reste aussi chaud, ni comment les radiations sont amplifiées dans l'environnement spatial de la Terre pendant un orage géomagnétique. Il faudrait donc garder un meilleur équilibre entre les AO pour les recherches fondamentale et appliquée.

- **Transpositions des concepts héliosphériques pour l'étude d'objets astrophysiques hors du système solaire et des plasmas de laboratoire :**

Les recherches du PNST permettent des découvertes en physique fondamentale des plasmas, et aussi des développements méthodologiques innovants dans la simulation numérique et l'instrumentation. Dans une certaine mesure, ces résultats obtenus sur les systèmes et les objets de l'héliosphère peuvent être transposés à l'étude d'autres plasmas, qu'ils soient des plasmas naturels, notamment astrophysiques, ou des plasmas de laboratoire typiquement de fusion, mais aussi pouvant simuler des écoulements astrophysiques.

Au cours de ces dernières années, la communauté PNST a ainsi accru son dialogue avec différentes composantes de la physique des plasmas. Côté astrophysique, plusieurs équipes ont notamment échangé sur les méthodes numériques, et ont commencé à se solliciter mutuellement pour être dans des jurys de thèse. Des travaux ont aussi été renforcés sur les plasmas astrophysiques de haute énergie, avec la physique des pulsars et l'accélération des particules. Côté laboratoire, de nouvelles collaborations ont démarré, par exemple avec des équipes de laser à haute puissance permettant d'induire des champs magnétiques sans graine initiale par un effet barocline, et d'en étudier la reconnexion dans des géométries ajustables.

5. Méthodologies, état des lieux et évolutions

5.1 Méthodologies fortes

La communauté nationale du PNST pave relativement bien l'ensemble des approches méthodologiques que l'on retrouve dans la communauté internationale, depuis l'instrumentation spatiale et les observations au sol, les centres de données, et un couplage fort avec la simulation numérique et la théorie.

- Instrumentation spatiale :

Une force principale du PNST depuis plusieurs décennies est l'instrumentation spatiale. En effet, la France est présente sur quasiment toutes les missions récentes et en cours telles que **SoHO**, **Cluster**, **STEREO**, **SWARM**, **THEMIS (NASA)**, **SDO**, **MAVEN**, **MMS**, **Juno**, **Parker Solar Probe**, **Bepi Colombo** et **Solar Orbiter**, et plus récemment **JUICE**. Cette force est historique, comme l'atteste notamment le rôle très important de la France dans les anciennes missions **SoHO** et **Cluster (ou encore Giotto, Interball, Rosetta, etc.)**, il convient donc de noter ici que la communauté a su en assurer la continuité sur plusieurs générations de chercheurs.

D'un point de vue prospectif, c'est cette même force qui permet à la communauté d'être non seulement présente sur les grands projets spatiaux à venir dans la discipline, notamment **SOLAR C** (JAXA, lancement 2028), **Comet Interceptor** (ESA, lancement 2029) et **HelioSwarm** (NASA, lancement 2029), mais aussi de se projeter dans les priorités majeures que sont **Plasma Observatory** pour la magnétosphère de la Terre et **M-Matisse** pour celle de Mars (ESA, M7, phase A), de se positionner sur **VIGIL** pour la physique solaire (ESA, S2P [ex-SSA]), de travailler à plusieurs projets pour l'étude de l'ionosphère tels que **NanoMagSat** (ESA), et de se préparer à participer à aux **futures missions flagship des « Decadal Survey » américains**.

Ce dynamisme et les expertises qui vont avec sont cependant mis en difficultés par la conjoncture actuelle dans les UMR sur l'emploi des ingénieurs et des techniciens. La baisse du nombre d'ITA fait qu'il devient de plus en plus difficile pour les équipes techniques de maintenir des activités de R&T. Ce point est développé plus bas, dans la Section 6.4 qui concerne la prospective instrumentale.

- Services de surveillance au sol :

Si d'une part l'évolution de la communauté au cours des vingt dernières années a conduit à une diminution de son investissement dans l'instrumentation dans grands projets sol de la discipline, d'autre part l'intérêt et les efforts sont restés particulièrement soutenus autour de la maintenance et de l'exploitation des instruments de surveillance du Soleil et de la Terre, notamment dans le cadre de Services Nationaux d'Observation de l'INSU.

En surveillance solaire on peut notamment citer le **Spectrohéliographe de Meudon**, **METEOSPACE** à Calern, le **NRH** à Nançay, et **CLIMSO** au Pic du Midi. En surveillance ionosphérique et aurorale, il s'agit du réseau d'antennes haute-fréquences **SuperDARN** avec le radar français installé à Kerguelen. Et en surveillance des cosmiques, la France est responsable de la base de données **NMDB** (Neutron Monitor DataBase) pour le réseau international de moniteurs à neutrons qui permettent de mesurer le flux des rayons cosmiques et des SEP.

Ces activités sont très importantes pour la surveillance en temps réel et pour l'étude des évolutions à long terme, et le rôle de la France dans ce cadre est très apprécié au niveau international. Il convient cependant de noter que ces activités souffrent aussi de ressources humaines techniques très limitées, qu'il est souvent difficile de remplacer au gré des arbitrages qui se font souvent aux dépens des activités de surveillance sur des instruments anciens. De ce fait se pose la question paradoxale de la pérennité de ces forces du PNST.

- Études couplées sol-espace et multi-messagers :

Les travaux de recherche de la communauté internationale en héliophysique reposent depuis longtemps sur l'analyse d'observations provenant d'instruments variés appartenant à plusieurs missions spatiales et télescopes au sol, de même que sur les **observations multi-messagers** de **signaux lumineux** (de la radio aux rayons X), de flux de **particules énergétiques** (ions, électrons, neutres), et de **mesures in-situ des champs** (magnétiques et électriques) et du **plasma** (densité, composition, température, vitesse).

Au sein de la communauté internationale en héliophysique, beaucoup de chercheurs de communauté française ont été parmi les pionniers dans la conduite de la recherche couplant un grand nombre de ces observations, sans se restreindre à une mission ou à un petit nombre d'instruments. La communauté française conserve encore aujourd'hui une certaine avance dans cette façon de travailler, comme l'atteste le contenu de nos publications.

Il est possible que cette approche dominante soit liée à nos sources de financement qui sont très diversifiées et qui, pour la majorité d'entre elles, ne reposent pas sur des crédits fléchés pour l'exploitation d'une mission en particulier. C'est peut-être aussi dû au système éducatif français et à la culture de notre communauté, qui mettent l'accent un peu plus sur la compréhension des processus physiques et un peu moins sur les découvertes observationnelles.

Quelle qu'en soit la raison, le couplage des observations sol-espace et multi-messagers (avec les particules énergétiques, et avec les mesures in-situ) est une vraie force méthodologique et fait partie de l'identité de la communauté PNST.

○ Ressources numériques – centres et bases de données :

Avec ses nombreux instruments d'observation, le PNST a développé depuis longtemps une expertise reconnue et des services numériques autour des centres et des bases de données.

C'est ainsi que le PNST est impliqué dans deux grands centres de données soutenus par le CNES et étant des SNO labellisés par l'INSU, à savoir **MEDOC** et le **CDPP**. Ils comprennent non seulement des données d'observation, mais aussi des services variés incluant des logiciels et outils d'analyse (par exemple **HelioViewer**, **3DView**, **STORMS**), des données à valeur ajoutée, et même des simulations numériques. Ces centres participent aussi à l'IVOA, et sont ainsi accessibles via plusieurs des plateformes d'observatoire virtuel tels que le VSO (virtual solar observatory) et le PSVO (planetary science virtual observatory).

Le PNST comprend en outre plusieurs autres bases de données spécialisées, qui offrent aussi des services en plus de leur activité d'archivage et de diffusion. Ces bases sont **BASS2000** et **SecchiRH** (pour le Soleil), l'International Service of Geomagnetic Indices (**ISGI**), le Bureau Central de Magnétisme Terrestre (**BCMT**), et l'Ionizing Particle Onera Data base (**IPODE**).

Une réflexion est en cours sur l'utilisation de data centers régionaux pour héberger certaines de ces ressources, petites ou grandes, mais le sujet n'est pas encore mûr au PNST. Tous ces aspects sont développés plus bas dans la Section 6.5 dédiée à la prospective numérique du PNST.

○ Simulation numérique – Calcul de Haute Performance (HPC) :

De même que la diversité des plasmas héliosphériques motive l'utilisation d'instruments d'observations variés, cette même diversité conduit le PNST à développer et/ou à exploiter de nombreux codes de simulation numérique.

Les codes de la discipline reposent sur des régimes physiques qui sont spécifiques aux différentes composantes de la communauté héliophysique, en particulier la composante « plasmas in-situ » et la composante « observations remote-sensing ». On peut ainsi citer notamment la **MHD** pour les grandes échelles, l'approche **hybride**, le **particle-in-cell** et les codes **Vlasov** pour les plasmas sans collision aux plus petites échelles du plasma, les codes **centre guide** pour les particules énergétiques, et le **transfert radiatif** et la **polarisation** pour le couplage aux observations spectroscopiques et spectro-polarimétriques. Malgré leurs spécificités, nombre de ces approches font aussi appel à des problématiques physiques et algorithmiques communes (comme le traitement de la diffusion numérique, des conditions aux limites, et de la condition $\text{div}B=0$). Ce sont ces points communs qui en font de la simulation numérique un des liens de la communauté PNST, et qui permettent des ouvertures aux interfaces (voir Section 3.2).

Les plus gros codes numériques développés par la communauté (en termes d'ETP développeurs et de taille de code) sont actuellement **PHARE** et **Dyablo** (codes versatiles en cours de développement, ayant vocation à devenir des codes communautaires à inclure dans l'ANOCC), le code **SMILEI**, et plus anciennement **LatHyS** (Latmos Hybrid Simulation), **IPIM** (Irap Plasmasphere Ionosphere Model), **Salammbô** (pour les ceintures de radiation), **OHM** (Observationally-driven High-order scheme Magneto-hydrodynamics) et **EGM** (Exospheric Global Model), **UNNOFIT** (pour l'inversion des données spectro-polarimétriques) ainsi que **XTRAPOL**, **MeteoSol** (pour les éruptions solaires) et **VP** (pour le vent solaire). En plus de ces codes entièrement ou principalement développés en France, la communauté PNST exploite aussi massivement plusieurs grands codes développés à l'étranger, souvent avec des inputs de chercheurs français, notamment **ASH** (pour l'intérieur solaire), **ARMS** (pour les phénomènes solaires éruptifs), **AMRVAC** (pour des applications solaire et planétaire) et **PLUTO** (pour divers applications MHD). Et pour finir, de nombreux codes plus petits, mais tout aussi importants pour la simulation de processus physiques très ciblés, sont aussi développés ou exploités dans nos laboratoires.

En termes d'infrastructures pour le HPC, la communauté exploite les machines nationales de **GENCI**, ainsi que plusieurs **méso-centres régionaux**, soit pour des calculs moins lourds, soit pour préparer leur portage vers des machines plus grandes.

Les enjeux pour l'avenir de cette forces méthodologique du PNST sont développés plus bas dans la Section 6.5.

5.2 Méthodologies en difficulté

○ Instrumentation sol :

Les transformations de la communauté au cours des vingt dernières années, qu'elles soient liées aux contraintes externes (faibles recrutements) ou internes (évolutions thématiques), ont conduit à une diminution importante des compétences et de l'investissement dans l'instrumentation des grands projets sol.

C'est notamment vrai **en physique solaire**, avec la quasi-disparition du nombre de chercheurs impliqués dans les développements instrumentaux au Pic du Midi et à THEMIS dans le visible, et au NRH en radio entre 150-450 MHz. C'est cette situation qui fait que la pérennité du NRH n'est plus assurée, et que la communauté n'est plus en capacité de fournir un PI pour une participation instrumentale au futur European Solar Telescope (EST). Cette situation est malheureusement aussi vraie **en physique ionosphérique**, où le très faible nombre de chercheurs français sur cette thématique a conduit le PNST en 2020 à recommander à la CSAA de retirer son soutien à ESICAT, et qu'il rend incertain la continuité de son investissement dans SuperDARN qui observe en radio typiquement entre 10-14 MHz.

Il convient cependant de noter que ces faiblesses n'empêchent pas la communauté d'être toujours intéressée par la science faite avec les infrastructures d'observation sol dédiées au PNST. En ionosphérique, la communauté s'était bien mobilisée autour du projet TARANIS, et elle reste impliquée dans plusieurs autres projets depuis. En solaire, un regain d'intérêt s'est exprimé pour une participation à EST, notamment pour l'exploitation scientifique de ses données qui seront fournies par le télescope au format « science ready ».

Il faut aussi noter que des nouveaux instruments sols, qui ne sont pas entièrement dédiés au PNST mais qui peuvent tout de même servir ses objectifs scientifiques avec des « observations sur campagne », ont été récemment développés et mis en service avec des participations importantes de chercheurs du PNST. On peut notamment citer ici NenuFAR, qui permet d'effectuer des observations du Soleil et de Jupiter en radio entre 10-85 MHz.

En résumé, malgré un intérêt scientifique soutenu, et quelques succès tout de même, l'instrumentation sol est globalement devenue une faiblesse au PNST, avec les risques de décrochage que cela implique pour les projets futurs.

- **Trous programmatiques** – risques en magnétosphérique, problème en solaire :

La programmation des futures missions spatiales de l'ESA risque d'avoir des conséquences importantes sur la communauté dans les années à venir.

D'abord, il n'y a aucune grande mission solaire de prévue en Europe **après Solar Orbiter**. Alors que la NASA et la JAXA multiplient les projets (MUSE, PUNCH, SOLAR-C). Le seul projet est VIGIL, qui sera peu innovant pour la recherche en physique solaire, et plutôt orienté vers la surveillance du Soleil pour la météorologie de l'espace. Ensuite, les décisions à venir au niveau de l'ESA pour la mission M7 pourraient mettre les thématiques associées à l'étude de la magnétosphère terrestre dans la même situation, si le projet **Plasma Observatory** n'était in fine pas retenu.

Ces deux situations constituent donc un risque pour les communautés spatiales solaire et magnétosphérique, qui sont des pierres angulaires du S et du T de l'acronyme PNST, et qui sont au cœur des recherches fondamentales qu'il faut continuer à mener pour arriver à des prédictions quantitatives des relations Soleil-Terre. Cette faiblesse programmatique pourrait donc aussi avoir des répercussions sur la position de la France dans le paysage international de la météorologie de l'espace.

- **RH en ITA** – notamment pour les bases de données et la surveillance au sol :

La situation des ressources humaines dans les UMR en termes de personnels techniques en général, et d'ingénieurs en particulier, devient problématique pour *toutes* les méthodologies du PNST.

L'activité de **R&T** pour développer des instruments nouveaux et innovants est très difficile avec la diminution du nombre d'ingénieurs de recherche. Elle n'est aujourd'hui pas remplaçable par des prestataires, car leurs entreprises ne sont pas intéressées par ces sujets technologiques de niche. La **réponse aux appels d'offre** pour des projets internationaux devient difficilement gérable, avec des équipes techniques réduites qui deviennent vite surchargées. La pérennité des observations avec les **instruments au sol de surveillance** du Soleil et de l'ionosphère est ainsi remise en cause, même si elle nécessite peu d'ETP. Et le développement de **grands codes numériques** modernes est rendu très difficile, car il relève maintenant de métiers différents de celui du chercheur, et les ingénieurs HPC sont encore trop rares.

Cette situation n'est bien sûr pas spécifique au PNST. Mais le PNST tient à mentionner ici qu'elle constitue un risque important pour l'investissement de la communauté française dans les grands projets de la discipline, là où d'autres acteurs internationaux mettent des moyens. Ce point est tellement critique qu'il est **évoqué dans les trois sections 6.3, 6.4 et 6.5** de prospective qui sont consacrées aux SNO, aux instruments, et au numérique.

5.3 Méthodologies émergentes

- Utilisation des **GPU** pour le HPC et le HPDA :

Les architectures des infrastructures numériques pour le calcul et le traitement de données massives sont en train d'évoluer largement depuis quelques années. Ces évolutions sont nécessaires, d'une part pour assurer la soutenabilité de la croissance des moyens de calcul mis à la disposition de l'enseignement supérieur et de la recherche dans le contexte de l'accroissement des **coûts de l'énergie**, et d'autre part pour réduire le taux d'**émission de gaz à effet de serre** par heure-processeur de calcul afin de limiter l'empreinte carbone du numérique.

Les communautés scientifiques et industrielles du calcul et du traitement de données promeuvent donc le développement de nouvelles technologies moins énergivores. C'est dans ce contexte que l'on voit se profiler un changement de paradigme dans le HPC, allant vers moins

de Central Processing Units (CPU), au profit d'utilisation croissante des **Graphics Processing Units** (GPU). La réalisation en 2020 d'une extension à la machine Jean Zay à l'IDRIS, l'ouverture en 2023 de la nouvelle machine Adastra au CINES et le projet de machine exascale cofinancée par la France et l'Union Européenne qui sera installée au TGCC, s'inscrivent toutes les trois dans cette dynamique d'augmentation de la part des GPU dans les grands centres de calcul. Cette tendance est aussi observée dans plusieurs méso centres en régions.

Ces changements d'architecture imposent à la communauté PNST, dont l'une des forces est le HPC (cf Section 5.1), de faire évoluer ses codes existants et de changer de paradigme pour ses futurs grands codes. C'est un savoir-faire que la communauté commence tout juste à développer.

- Développement de **codes communautaires français** :

Un autre changement de méthode qui concerne le HPC au PNST depuis quelques années est le développement de codes communautaires, en lieu et place des codes d'équipe développés jusqu'alors.

Les raisons à ce changement sont multiples. D'une part il est lié au besoin de mettre en commun les efforts des chercheurs pour la maintenance et les développements du code, dans une communauté scientifique de petite taille. D'autre part, il est rendu nécessaire par la professionnalisation de l'ingénierie HPC qui requiert des compétences spécifiques autres que celles des chercheurs pour construire et optimiser des codes nouveaux, notamment avec la gestion du parallélisme dans les nouvelles architectures de machine.

C'est dans ce contexte que la communauté PNST a été partiellement impliquée dans le développement du code **SMILEI**, et qu'elle est leader dans le développement en cours des codes **Dyablo** et **PHARE**.

- Codes de nouvelle génération : **multi-physiques, couplage de codes, assimilation de données** :

L'accroissement de la puissance de calcul d'une part, et l'utilisation des codes numériques pour faire des interprétations directes des observations ou pour prédire des événements dans le cadre de la météorologie de l'espace d'autre part, motivent le développement de nouveaux types de codes. Les chercheurs du PNST spécialistes des simulations numériques travaillent donc maintenant à de nouvelles méthodologies.

Certaines nouvelles approches visent à traiter directement certains **aspects multi-physiques** qui étaient jusqu'ici paramétrés dans les codes (par exemple la diffusion dans les codes MHD, ou les forçages extérieurs dans les codes PIC).

D'autres développements sont poussés vers le **couplage de codes**. En premier lieu il s'agit d'utiliser de façon dynamique les outputs d'un code pour alimenter les inputs d'un autre code (par exemple une éruption solaire initiée dans un code coronal, qui vient se propager dans un code de vent solaire). En second lieu, les projets visent à ce que chaque code puisse injecter des informations vers l'autre, et vice-versa (par exemple entre la magnétosphère et l'ionosphère).

Finalement, un effort est développé dans plusieurs thématiques du PNST pour faire de l'**assimilation de données**. En premier lieu juste comme l'injection de conditions initiales (par exemple une reconstruction du champ magnétique coronal comme point de départ d'une simulation MHD d'éruption solaire – on parle de « data-initiated models »). En second lieu, il s'agit d'assimiler des données à intervalles plus ou moins réguliers pendant la simulation, par exemple pour affiner la précision des prévisions en météorologie de l'espace.

Si certains de ces développements ont déjà vu le jour de façon ponctuelle au PNST, leur généralisation reste du domaine de la recherche méthodologique, et constitue depuis quelques années une part des efforts de quelques équipes.

- **Intelligence artificielle, Machine Learning et big data :**

Le volume des données accessibles à la communauté n'a fait que croître avec la multiplication des sondes spatiales et des instruments au sol. De ce fait, la communauté internationale se saisit progressivement des outils de l'IA et du ML pour l'analyse de ces données massives, et pour en extraire des informations difficiles à obtenir par des voies plus classiques de traitement de données.

La communauté PNST commence à utiliser ces nouveaux outils pour le HPDA, notamment pour la reconnaissance de forme en physique solaire, avec la mesure de la géométrie des **nuages magnétiques** associés au CME, ainsi que pour l'analyse statistique des données magnétosphériques visant à caractériser la **magnétogaine** et la **magnétopause** du côté jour de la Terre et les processus associés, tels que la reconnexion magnétique.

L'usage de ces méthodologies est encore restreint à un faible nombre d'équipes au PNST, mais il est probablement amené à croître au cours du prochain quinquennat, du fait des découvertes originales que l'on commence à faire avec elles.

6. Colloque & Questions de prospective

6.1 Motivations et organisation des colloques du PNST

Le PNST organise des colloques de manière quasi-bisannuelle, avec 2 colloques par mandat quinquennal. Le colloque à mi-parcours est un colloque purement scientifique, destiné à promouvoir les collaborations, les thématiques établies mais aussi les émergences, et de mettre en avant les jeunes de la discipline auprès de leurs pairs. Ce colloque a eu lieu, à Marseille, et un peu en retard en raison de la COVID, en Mai 2022. Un deuxième colloque, à la fois scientifique et de prospective, est organisé en fin de mandat afin de préparer le bilan et la prospective du programme. Nous avons organisé ce colloque en Janvier 2024, à Marseille également.

Le nombre de participants au colloque du PNST est typiquement de l'ordre de 100 à 130 personnes ces dernières années. Afin de fédérer la communauté, les directions s'efforcent de longue date d'organiser les colloques dans un centre de conférence de type village de vacances, de sorte que l'ensemble des participants dorment, déjeunent et dînent sur place, sur une durée de 3 à 5 jours. Cela permet de promouvoir les collaborations et les temps conviviaux de façon à maintenir le sentiment de communauté, déjà fort, au sein du PNST.



Photo des participants au colloque scientifique et de prospective 2024 du PNST

Par ailleurs, pour minimiser les déplacements et ainsi les impacts économiques et écologiques, le PNST s'efforce d'organiser les colloques en un lieu facilement accessible par train depuis les laboratoires principaux de la discipline.

La partie scientifique du dernier colloque de Janvier 2024 était structurée en 7 sessions transdisciplinaires. Elles ne sont pas liées à des objets ou systèmes, mais plutôt à des processus, méthodes ou approches physiques qui sont communes à toute la communauté, à savoir : 1) Simulations et outils numériques, 2) Nouvelles missions et instrumentation (sol et espace), 3) Couplages entre enveloppes de plasma, 4) Transport d'énergie multi-échelles et turbulence, 5) Mécanismes d'accélération des particules et chauffage du plasma, 6) Activité éruptive ou impulsive dans les plasmas, et 7) Relations Soleil-Terre et météorologie de l'espace.

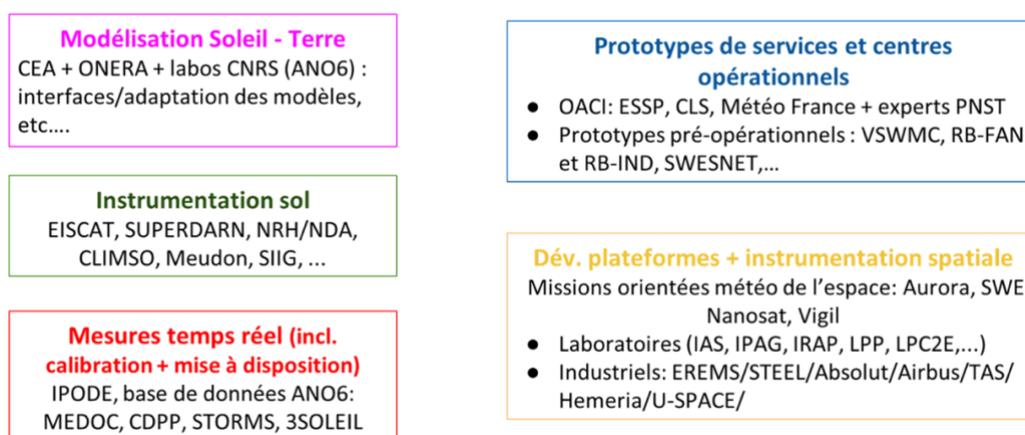
Du souhait du CS du PNST, la partie prospective du colloque a été organisée autour de 6 thèmes, sous la forme de tables rondes où tout un chacun est amené à s'exprimer. Les résumés des discussions sur ces thèmes sont présentés dans les prochaines sections : 1) PNST et météorologie de l'espace, 2) Les SNO du PNST, 3) Prospective instrumentale, 4) Prospectives numériques, 5) Enseignement, communication, science participative, et 6) Impact environnemental.

6.2 PNST et météorologie de l'espace

La météorologie de l'Espace est un domaine large dont le périmètre a été détaillé par l'organisation mondiale de la météorologie, puis adapté au périmètre même de la communauté PNST lors de la précédente prospective. A noter que cette discipline est également reconnue au sein du groupe OTAN Military Space Weather, où elle a reçu une définition officielle en 2023. Ainsi, elle vise in fine la prévision de l'impact d'événements solaires sur l'environnement terrestre au sens large. Cependant les processus physiques et leurs interactions dynamiques sur de nombreuses échelles à l'œuvre tout au long de la chaîne Soleil - Terre sont encore mal compris, ce qui nécessite des travaux en recherche fondamentale bien en amont. Une transition entre la recherche fondamentale et ses applications en météorologie de l'espace nécessite un travail important afin de rendre modèles et outils scientifiques suffisamment performants pour répondre aux contraintes opérationnelles. Pour cela, des techniques souvent peu utilisées en recherche fondamentale, par exemple l'assimilation des données ou l'apprentissage automatique, peuvent être combinées aux outils existants afin de contraindre et de corriger les modèles en temps réel.

Pour cette prospective 2024-2029, nous nous posons la question du positionnement du PNST et de son implication sur cette thématique très large, à l'interface entre recherche fondamentale et applicative. Actuellement, la communauté PNST s'implique déjà activement dedans, du fait de son positionnement très transverse, depuis l'observation solaire, magnétosphérique et ionosphérique à leurs modélisations. La Figure 1 présente une cartographie macroscopique des principales implications de la communauté (liste non exhaustive).

Cartographie des activités Météo de l'Espace dans la communauté PNST (liste non exhaustive)



De plus, depuis la prospective précédente, la communauté PNST, soutenue en particulier par le CNES, s'est davantage organisée autour de la Météo de l'Espace. Ainsi le groupe de travail CNES SHM, le GCME et l'OFRAME se complètent et permettent aujourd'hui de fédérer davantage les activités de la communauté aussi bien à l'échelle nationale qu'au niveau européen. En novembre 2023, Toulouse a accueilli l'ESWW (European Space Weather Week), dont l'organisation a été portée en premier lieu par l'OFRAME et la communauté PNST.

Plusieurs questions se posent aujourd'hui quant au positionnement de la communauté du PNST sur cette thématique pour les années à venir. En effet, la plupart des guichets de financement en lien avec la Météorologie de l'Espace se focalisent sur des activités très aval de prototypage de services coordonnés à l'échelle européenne (financements UE et ESA). Les actions mutualisées autres, que ce soit au niveau français et/ou européen, restent pour le moment épisodiques. Il est toutefois à noter l'essor de E-SWAN (European Space Weather and Space Climate Association) souhaitant promouvoir et organiser les activités en Météorologie de l'Espace à l'échelle de l'Europe, et au niveau national, principalement par les financements coordonnés de la DGA et de l'ANR, via l'AID.

Il est important que cette prospective se focalise sur la place de la Météorologie et de la Climatologie de l'Espace au sein de la communauté PNST, aussi bien en tant **que thématique scientifique amont, que thématique de recherche fédératrice et enfin de recherche applicative**. En effet, la communauté PNST est riche de laboratoires (CNRS et EPIC) complémentaires, permettant d'observer et de modéliser la chaîne complète du Soleil jusqu'à l'ionosphère.

La météorologie de l'espace est d'abord une science fondamentale combinant modélisation et mesures. Cependant, aujourd'hui encore, elle peine à être reconnue comme telle en France. Par cette prospective, nous souhaitons mettre en avant le besoin de la communauté PNST de poursuivre ses efforts afin de développer cette thématique, l'accompagner et la valoriser. En particulier, aujourd'hui nous identifions plusieurs orientations qu'il faut soutenir pour les 5 prochaines années et au-delà :

- *Implication et soutien de la communauté PNST pour les missions spatiales européennes et internationales dédiées à la surveillance de l'Espace* (où la météorologie de l'Espace occupe une place importante) : l'ESA-ESOC, par son programme S2P (Space Safety Program), est très structurant au niveau international, notamment les deux missions complémentaires SWE-NANOSAT et AURORA à très forte participation française et faisant partie du programme ESA-Distributed Space Weather Sensor System (D3S). La mission VIGIL (L5, anciennement LAGRANGE, prévue pour 2031) sera la mission phare du programme Space Weather de l'ESA de la prochaine décennie, la perspective récente d'intégrer des instruments innovants dans cette mission intéresse de plus en plus la communauté PNST. Les instruments et mesures découlant de ces missions (entre scientifiques et opérationnelles) sont primordiales pour cette thématique scientifique, que ce soit des mesures magnétosphériques que vent solaire ou solaire même.

- *Soutien renforcé pour des instruments sols souverains permettant d'observer et de caractériser les relations Soleil-Terre* : la synergie entre mesures sols et spatiales est de première importance et nécessite de disposer de mesures en temps quasi-réel et/ou complémentaires les unes des autres. Notons en particulier pour la surveillance solaire (aussi bien radio qu'optique) les observatoires NRH, ORFEES, CLIMSO, THEMIS, ..., ainsi que les réseaux de surveillances et de mesures ionosphériques, en particulier SuperDARN et l'initiative VNET4IONS, et enfin les mesures sol neutrons et leur base de données associée NMDB (Neutron Monitor Data Base). Il est important de noter ici qu'un tel soutien est nécessaire également pour pouvoir disposer de séries temporelles longues et exploitables, ainsi que pour maintenir de tels instruments sol sur le long terme.

- *Valorisation des travaux couplant mesures hétérogènes et/ou modélisation pour mieux simuler l'influence du Soleil sur l'environnement spatial et ionosphérique terrestre* : au cours des dernières années, plusieurs initiatives ont été menées pour analyser et caractériser avec succès des événements solaires en combinant mesures hétérogènes (mesures in-situ de Solar Orbiter et mesures sol du NRH par exemple) et modélisations (applications de méthodes d'assimilation de données et/ou d'apprentissage profond). Il est important que le PNST soutienne et valorise ses études souvent éparses dans les années

à venir pour multiplier de telles initiatives et ainsi favoriser la compréhension fine de la propagation des structures solaires jusqu'à l'environnement terrestre (mais aussi planétaires).

La météorologie de l'Espace est également une science applicative à l'interface entre les différentes thématiques scientifiques couvertes par la communauté du PNST. En effet, pour comprendre la dynamique induite dans la magnétosphère interne ou l'ionosphère, il est nécessaire de comprendre la propagation des structures solaires (éjections de masse coronale, trous coronaux, éruptions solaires) depuis leurs régions d'activation, et de quantifier efficacement les transferts d'énergie aux interfaces entre les différents milieux (couronne solaire, vent solaire, magnétosphère). Ces besoins de synergie et de travail collaboratif croissants entre thématiques scientifiques apparaissent donc aujourd'hui comme primordiaux à soutenir dans les prochaines années, en particulier :

- *Favoriser et valoriser les cadres d'études et les synergies entre les différentes thématiques scientifiques couvertes par le PNST* : depuis plusieurs années, de nombreux projets européens et appels d'offres ESA (ESOC en particulier) ont favorisé la collaboration entre partenaires institutionnels afin de mettre en place des prototypes de services de météorologie de l'Espace en reconstituant (mesures et modélisations) la chaîne complète du Soleil jusqu'aux ceintures de radiation, voire l'ionosphère. Il a récemment été noté qu'un tel chaînage scientifique pourrait être réalisé uniquement en partenariat franco-français, puisque toutes les compétences sont disponibles en France. En conséquence, favoriser de telles initiatives permettraient de mieux comprendre les besoins aux interfaces entre domaines scientifiques souvent hermétiques (la plupart du temps par manque de temps et de cadre formel), et ainsi de permettre aux équipes françaises de parfaire leurs expertises.

- *Valoriser la complémentarité de mesures hétérogènes et la revisite de mesures (en particulier les longues séries temporelles) selon une perspective applicative de météorologie de l'Espace* : les besoins pour la météorologie de l'Espace peuvent être différents de ceux qu'un expert peut rechercher pour comprendre la physique fondamentale d'une structure solaire ou d'un orage géomagnétique. Cela revient à interpréter et exploiter les mesures in-situ ou sol de manière différente, afin de répondre à un besoin davantage statistique qu'une étude de cas. De nombreux jeux de données sont disponibles en France, et leurs potentiels sont forts, d'autant plus que ces jeux de données couvrent une grande période temporelle. Notons par exemple les données de la mission Cluster qui aujourd'hui encore sont à l'origine de publications de grande qualité.

Enfin, la météorologie de l'Espace peut être considérée comme une science applicative des systèmes complexes, favorisant les échanges et les synergies entre la communauté PNST et les agences et industriels du spatial. En effet, du point de vue utilisateur du spatial, la météorologie de l'Espace est une information caractérisant un risque pour ses opérations sols et/ou spatiales. Il a été identifié que de nombreux instituts faisant partie de la communauté PNST sont en interactions avec de tels utilisateurs. Il nous semble donc important dans les années à venir de consolider et valoriser cette position d'expertise en :

- *Favorisant les synergies intra-communauté PNST et en dehors, de sorte à comprendre les besoins opérationnels et comment y répondre* : créer et développer cette interface humaine entre experts scientifiques et acteurs du spatial est fondamentale, car quelle que soit la finalité opérationnelle recherchée, cela nécessite toujours de remonter à sa source physique afin de l'anticiper et/ou la caractériser. D'ailleurs, la définition de la météorologie de l'espace inclut elle-même l'évaluation des risques sur les activités humaines, or cela ne peut être rendu possible qu'avec la participation des opérationnels qui maîtrisent les technologies qui sont impactées par les événements solaires. Cette démarche a été réalisée dans le cadre de l'OACI pour le transport aérien (dont des membres du PNST étaient les experts scientifiques de la mise en place du service de météorologie de l'espace associé) avec la mise en place du service opérationnel SIEVERT à partir de la base de données NMDB des mesures de moniteurs neutrons. Il est donc légitime d'encourager et valoriser le même développement à des altitudes plus élevées, ou tout type d'initiative permettant de répondre à un besoin opérationnel en lien avec les relations Soleil-Terre. On note l'émergence de structures officielles entre les mondes académique et industriel autour de la météorologie de l'espace avec notamment la création récente d'un laboratoire commun entre l'IRAP et Thalès: Ionospheric Research Institute IRAP-Thalès (IRCIT) qui

visé dans un premier temps à fournir de nouveaux services de prévisions des perturbations ionosphériques sur le positionnement par satellites en régions équatoriales.

- *Favorisant et soutenant l'essor de modèles réduits reposant sur les modèles scientifiques complexes de la communauté PNST* : comme pour l'instrumentation scientifique spatiale, il est possible de décomposer l'évolution de codes scientifiques sous la forme d'une montée en TRL. Pour des besoins opérationnels, il est nécessaire d'avoir des temps de calcul réduits, mais en contrepartie une donnée de sortie plus macroscopique (et donc moins précise) que la grandeur physique elle-même. Il a été identifié au colloque de janvier 2024 que de plus en plus de scientifiques (en particulier jeunes) s'emploient à explorer les possibilités de techniques de type modèles réduits, et apprentissage profond pour accélérer des codes complexes tout en minimisant la perte de précision. Il est donc primordial de ne pas négliger cette tendance, très complémentaire de la poursuite du développement de modèles scientifiques complexes et précis.

- *Mettant la priorité sur l'estimation et la maîtrise des incertitudes instrumentales et de modélisation, ainsi que sur leur propagation* : en météorologie de l'Espace, il est nécessaire de coupler modèles entre eux et avec des mesures in-situ. De nombreuses techniques existent et la communauté PNST est de plus en plus investie dedans, que ce soit l'assimilation de données ou l'apprentissage profond par réseaux de neurones. En conséquence, les incertitudes de chaque élément entachent la chaîne complète et donc la prévision. Estimer et maîtriser ces incertitudes est donc fondamentale pour progresser sur cette thématique scientifique, et ce point est également crucial pour la dimension applicative, qui nécessite l'affichage d'un niveau de confiance dans les alertes relatives aux événements géo-efficaces. C'est en particulier un domaine en plein essor, ou pour l'instant tout est à mettre en forme et normaliser. Le cadre du PNST est totalement adapté à soutenir fortement cela.

6.3 Les SNO du PNST

Lors de son colloque de prospective le PNST s'est prononcé dans sa grande majorité pour **regrouper** les nombreux services nationaux d'observation qui dépendent de son périmètre en de plus gros services. S'il a bien été rappelé que tous ses services, quelques soient leur taille et leur statut, sont des services qui répondent à des besoins de la communauté, et si la grande variabilité de ces services reflète bien la diversité scientifique et technologique très différentes qui est propre à l'astrophysique en général, ce regroupement apparaît néanmoins nécessaire afin d'assurer leur visibilité et de les renforcer.

Un regroupement des SNO2 **par type d'instrument** spatial est ainsi jugé pertinent. Un tel regroupement permettrait de labéliser une filière technologique, de mettre en commun les expertises expérimentales des laboratoires français de la discipline, d'éviter qu'un service disparaisse en cas de départ à la retraite ou d'arrêt d'une mission, tout en garantissant une meilleure visibilité pour les candidats Astronome-Adjoint au CNAP. De même, un regroupement des SNO5 qui dépendent du PNST au sein d'**une infrastructure de recherche dédiée aux données de physique des plasmas** est à l'étude dans le but d'assurer leur pérennité et renforcer le leadership français dans le domaine en Europe. Un regroupement thématique des SNO6 en météorologie de l'Espace est également souhaitable, à travers par exemple la mise en place d'**un unique service ionosphérique**.

Enfin, des solutions pratiques visant à améliorer l'**animation**, la **visibilité**, et les **recrutements** au sein des services qui dépendent du PNST doivent être mises en place à court terme, à travers l'organisation d'une journée de présentation des services lors des colloques du PNST, de webinaires, de visites de SNO, et la diffusion sur le site du PNST d'informations concernant les services.

6.4 Prospective instrumentale

Les moyens d'observation et d'instrumentation développés au sein de la communauté du PNST se distinguent en deux grandes catégories : l'instrumentation spatiale et l'instrumentation sol. Un recensement non-exhaustif des moyens en opération ou en développement, montre que l'instrumentation spatiale concernerait environ 70% des projets, contre 30% pour l'instrumentation sol. De ces projets instrumentaux environ deux tiers sont actuellement en opération, et un tiers concerne les instruments en

développement, des projets R&T (Recherche et Technologie) financés, ou des projets pas encore financés. Enfin, les projets instrumentaux de la communauté PNST montrent des collaborations internationales pour plus de 70% des développements.

Ces deux grandes catégories d'instrumentation, bien que complémentaires pour la recherche et la surveillance à long terme du Soleil, et ses relations avec la Terre et les planètes, sont confrontées à des enjeux différents en ce qui concerne la prospective du PNST.

- **Instrumentation Spatiale :**

Le grand débat pour cette prospective instrumentale se pose entre privilégier la réponse aux Appels d'Offres (AO) avec des technologies existantes à un niveau de maturité élevé (TRL élevé), et investir dans la R&T pour développer de nouvelles technologies. Actuellement, la priorité est donnée à la réponse aux AO actuels avec notre participation aux missions internationales futures et d'opportunité (cf. sections précédentes). Mais il est essentiel de ne pas négliger la R&T, car elle est cruciale pour l'avenir de l'instrumentation spatiale scientifique et donc pour notre capacité à répondre aux futures AO.

En ce qui concerne la R&T, il existe des défis notamment dans le financement et la gestion des ressources humaines, ainsi que l'adaptation à l'externalisation des métiers. Les ingénieurs de recherche (IR) sont souvent absorbés par la gestion et la réalisation de projets engagés, laissant donc peu de temps pour la R&T. D'autre part, bien que le CNES finance la R&T, il est difficile de trouver des financements pour les ressources humaines (RH) associées. Cette situation conduit certains laboratoires à éviter d'entreprendre de projets de R&T, ce qui compromet l'innovation à long terme. La question des métiers est également cruciale, car l'externalisation vers des nouveaux acteurs du spatial (e.g. industrie) peut conduire à des pertes de compétences et à des défis de communication entre ingénieurs et chercheurs.

Il est donc nécessaire de trouver un équilibre entre réponses aux AO pour assurer des financements à court et moyen terme et l'investissement dans la recherche instrumentale pour assurer l'innovation à plus long terme. De plus, il est essentiel de fournir des ressources humaines supplémentaires pour la gestion de projet afin de libérer du temps pour la R&T. Il serait utile de trouver des mécanismes de financement alternatifs pour la R&T, afin de ne pas se faire distancer par d'autres acteurs.

Une des sources qui pourrait être explorée est le financement de thèses instrumentales pour pousser le développement de nouvelles technologies. La communauté s'est exprimée de manière favorable à cette perspective, mais des problèmes persistent, notamment en ce qui concerne le financement indirect et la libération du temps des ingénieurs pour assurer l'encadrement technique.

Une autre source consiste en la prise en compte de la R&T dans les AO, car de nombreuses technologies sont bloquées à des niveaux de maturité relativement bas (TRL 4-5). Il est nécessaire d'améliorer la cohérence et la collaboration entre les laboratoires pour mieux utiliser les financements disponibles à l'échelle nationale et internationale. Une approche de mutualisation des techniques, des moyens et des RH-experts-métiers pourrait permettre une meilleure préparation et faciliter la réponse aux AO, en évitant de fonctionner en silos et en mettant en commun les résultats de la R&T.

En conclusion, la communauté du PNST est très active, et reconnue mondialement, dans la réalisation d'instruments spatiaux, mais cela se fait à présent au détriment de la R&T amont. Il est évident que la R&T est essentielle pour l'avenir de l'instrumentation spatiale, mais des défis importants persistent en termes de financement, de ressources humaines et d'organisation. Il est crucial de trouver des mécanismes de financement alternatifs, d'améliorer la gestion des ressources humaines dans les laboratoires, quitte à potentiellement « sanctuariser » des ETP dans les labos pour la R&T, et de promouvoir une approche plus collaborative et cohérente à l'échelle nationale.

- **Instrumentation sol :**

L'instrumentation sol est essentielle pour la recherche et la surveillance à long terme de notre Soleil, comme l'atteste l'investissement de notre communauté dans les grands équipements nationaux (radiohéliographe de Nançay, Pic du Midi) et l'engagement auprès des grands instruments du futur (EST). D'autre part, l'instrumentation sol complète et enrichit de manière significative les données

recueillies par les sondes spatiales, tant pour les observations solaires que dans le contexte de l'exploration planétaire. Nous pouvons citer comme exemples les mesures radio de Jupiter (et ponctuellement Saturne) avec le réseau décimétrique de Nançay, ou l'étude de l'exosphère de Mercure, avec le télescope solaire THEMIS.

Par ailleurs, l'instrumentation sol sert très souvent comme preuve de concept avant la spatialisation des instruments. Bien que les besoins R&T ne soient pas aussi critiques que pour le spatial, il est crucial de maintenir ces instruments dans le temps (pour permettre par exemple de constituer ou de compléter des longues séries temporelles) et améliorer la couverture instrumentale. Pour cela, il est nécessaire de mettre en place des mécanismes de financement de la maintenance à long terme, tant au niveau européen qu'international.

Une question centrale est de savoir comment améliorer la couverture instrumentale au niveau du globe, qui est essentielle pour la compréhension des effets du Soleil sur l'atmosphère et l'ionosphère terrestre, en particulier. Il pourrait être judicieux d'explorer de nouvelles mesures à développer, de nouveaux paramètres à prendre en compte, ou encore d'adapter des technologies déjà utilisées ailleurs. Par exemple, il est essentiel d'améliorer la connexion entre le sol et l'espace pour mesurer les phénomènes à l'œuvre dans les couches ionosphériques D et F résultant des couplages entre les différentes couches de l'atmosphère (ondes de gravité, etc ...), ou encore pour étudier les processus auroraux. Déployer des instruments similaires à travers différentes zones géographiques est également crucial pour obtenir une couverture spatiale adéquate, notamment en ce qui concerne la reconstruction spatio-temporelle (4D) des couches ionosphériques.

Dans le domaine de la radioastronomie, il est nécessaire de déployer de nouveaux instruments basse fréquence. Des équipements comme le radiohéliographe à Nançay ou le lancement de NenuFAR nécessitent une maintenance constante pour assurer leur bon fonctionnement. En ce sens, il est aussi important de soutenir des projets R&T car il peut être difficile de reprendre un projet après une période prolongée de maintenance.

Le projet EST (European Solar Telescope) est en cours de développement. Bien que la France ne soit pas directement impliquée à l'heure actuelle, un sondage de la communauté PNST a montré un intérêt significatif pour un engagement de la communauté sur le projet afin de maintenir son engagement et ses compétences dans le domaine. L'INSU doit décider s'il doit maintenir des observatoires qui effectuent des mesures à long terme, et s'il est nécessaire de reproduire des instruments simples pour surveiller le soleil en continu. Cela soulève la question des ressources humaines disponibles et de la faisabilité technique.

Il est également important de distinguer le développement de nouvelles technologies (critiques pour la continuité des savoir-faire et compétences) et le maintien de technologies plus anciennes.

Dans le domaine de l'optique, il est nécessaire de développer de nouvelles technologies hyperspectrales, à la fois depuis l'espace et depuis le sol. Le maintien des instruments existants et le développement de nouveaux photomètres ou imageurs avec plus de capteurs sont également essentiels pour accéder à des échelles (spatiale et/ou temporelle) plus petites.

En résumé, pour améliorer l'instrumentation sol, il est crucial de mettre en place des mécanismes de financement à long terme pour la maintenance, d'explorer de nouvelles mesures et technologies en distinguant les développements critiques de ceux qui utilisent des technologies plus anciennes, tout ceci tout en maintenant le haut niveau de collaboration internationale actuel.

6.5 Prospective numérique

Comme dans l'ensemble de l'astrophysique, la communauté du PNST est très impliquée dans les développements numériques. En termes de prospective, les aspects les plus discutés lors de la table ronde organisée au colloque du PNST ont concerné trois domaines en particulier : HPC (High Performance Computing), HPDA (High Performance Data Analysis), et IA (Intelligence Artificielle). Les conclusions tirées de ces discussions sont résumées ci-après.

- **HPC (High Performance Computing)**

Les codes de simulation numérique haute performance sont aujourd’hui extrêmement utiles à la communauté PNST à plusieurs égards. Leur fonction première est de répondre à des questions fondamentales de la communauté en abordant les problématiques physiques de façon *ab initio*. De plus, ils offrent un support nécessaire à l’interprétation physique des observations au sol et dans l’espace. Enfin, ils fournissent dans certains cas aujourd’hui une aide pour planifier des missions spatiales, par exemple en modélisant de manière réaliste les environnements spatiaux (qui touchent au cœur des problématiques du PNST mais servent à l’ensemble de la communauté AA).

Avec la préparation aux machines exascale dans le monde, et en Europe en particulier, le génie logiciel prend une part extrêmement importante dans le développement de codes haute performance, faisant ainsi appel à des compétences rares chez les physiciens. La logique de développement de ces codes n’est plus accessible au chercheur isolé, et nécessite la mise en place d’une équipe aux compétences diverses. Le code-objet communautaire et open-source est maintenant la norme, nécessitant pour le développer et le maintenir sur le temps long un ensemble d’expertises (génie hardware, génie logiciel, mathématiques appliquées, physique). L’écueil est cependant d’assurer la pérennisation des efforts de développement de ces codes, qui nécessite un soutien en moyens humains sur les compétences qui ne forment pas le cœur de métier de l’INSU et du PNST. Cet enjeu couvre de la valorisation des thèses sur le développement de ces codes aux recrutements et financements pour leur développement et leur maintien.

Les chercheurs et équipes du PNST mènent des études numériques qui reposent sur un large spectre de codes. Cette richesse des outils est essentielle à la qualité de la recherche, car elle permet de paver de manière dense l’ensemble des thématiques du PNST, elle doit donc être soutenue de façon continue. Néanmoins, en considérant les efforts substantiels que représentent les développements de codes communautaires, deux initiatives sont à souligner particulièrement :

- le code Dyablo est un code MHD AMR multi-plateforme, basé sur la librairie Kokkos, et servant d’ores et déjà la communauté AA dans son ensemble (le code est développé sur un git privé pour le moment et va être déployé sur une plateforme publique courant 2024).
- le code PHARE est un code hybride-PIC AMR multi-plateforme, basé sur la librairie SAMRAI, qui servira à terme la communauté AA ainsi que l’astrophysique de laboratoire.

Ces deux codes sont appelés à être labellisés à l’INSU (ANO CC), car ils servent ou serviront une base large de chercheurs et ont été développés pour pouvoir être utilisés sur de multiples architectures (CPUs+GPUs, Intel, NVIDIA, AMD, ARM, etc..). De plus, un effort de veille technologique sera nécessaire sur les ordinateurs quantiques, dont les développements sont extrêmement rapides aujourd’hui.

L’accès aux données produites par ces codes, de façon ouverte et communautaire, apparaît comme un axe de travail majeur pour le PNST. Certains efforts ont déjà été entrepris dans cette direction (notamment en s’appuyant sur le CDPP et MEDOC, voir ci-dessous), mais doivent aujourd’hui continuer vers un interfaçage plus poussé vers les observatoires virtuels en astronomie (e.g. IVOA) ou en physique solaire (e.g. HELIO). Notons que des solutions pour proposer un accès dynamique à de larges bases de données de simulations numériques existent (par exemple l’initiative Galactica, initiative française actuellement hébergée en Allemagne, dont MEDOC hébergera un nœud en plus) et devraient être utilisées plus largement par la communauté PNST à l’avenir.

Finalement la communauté commence à regarder les ordinateurs quantiques et leur programmation sous forme de “portes logiques” plus proche de l’électronique que de la programmation classique des CPU, GPU ou APU (Accelerating Processing Unit) qui combinent les deux premiers avec une mémoire partagée facilitant les échanges CPU-GPU. A moyen terme, nous attirons l’attention sur la nécessité d’incorporer aussi les qbits dans les réflexions pour le développement des codes, des algorithmes IA ou du post-processing.

- **HPDA (High Performance Data Analysis)**

L'analyse de données hautes performances (HPDA) est aujourd'hui omniprésente au PNST. Deux plateformes majeures existent aujourd'hui pour la communauté PNST: MEDOC et le CDDP. Cette analyse haute performance s'applique pour les larges quantités de données observationnelles, mais également pour les larges jeux de données de simulations numériques (voir ci-dessus). Dans les deux cas, la problématique de mettre en place des bases de données et un accès rapide à celles-ci est fondamentale. Cela pose (comme dans la section sur le HPC) la question du développement et du maintien des codes d'analyse, mais aussi celle du choix des infrastructures pour les héberger. La gestion d'un centre de données devenant de plus en plus complexe (gestion écologique et économique des fluides, sécurisation des données, accessibilité réseau...), le monde de la recherche académique n'a plus forcément les moyens humains et financiers d'en assumer entièrement la charge. La communauté du PNST s'interroge sur la pertinence de l'externalisation (privé type OVH ou public type EOSC). Cette solution peut poser aussi le problème de la souveraineté des données, et doit être étudiée au cas par cas, car les coûts peuvent rapidement dériver pour certains types de besoins en fonction de la volumétrie ou de la fréquence des accès.

La communauté du PNST a par ailleurs le souci, dans le développement des codes de traitement et de visualisation, d'utiliser des formats de données ouverts, et d'assurer l'interopérabilité de ces données. Un effort est engagé (et doit se poursuivre) pour assurer la diffusion de ces outils, mais aussi la formation à leur utilisation, comme par exemple des formations régulièrement dispensées à MEDOC. C'est un point saillant qui devrait éviter du travail inutile, en mutualisant des codes ou segments de codes (même si le développement peut être vu comme un travail formateur pour les étudiants en thèse) nécessaires à l'exploitation de données. Une réflexion s'engage sur le moyen d'assurer l'information sur les moyens développés pour le traitement de données et la formation à ces outils.

La communauté du PNST devra mener ces efforts en concertation avec ses partenaires (le CNES notamment), qui eux aussi développent leurs outils (par exemple REGARDS pour l'archivage et la redistribution de données). Cela impose une stratégie commune. Notamment, le choix, comme pour le HPC, de proposer des codes en sources ouvertes et à licence libre. C'est à l'évidence le meilleur moyen d'assurer la diffusion des codes et leur utilisation à grande échelle, mais cela implique aussi des moyens humains conséquents pour répondre aux questions des utilisateurs et aux demandes de nouvelles fonctionnalités. Une réflexion s'engage aussi sur l'utilisation des moyens qui se mettent en place en soutien à la science ouverte comme EOSC (Nuage européen pour la science ouverte).

- **IA (Intelligence Artificielle)**

L'IA est un domaine large qui inclut l'apprentissage automatique. Cette composante est présente au PNST : plusieurs travaux de thèses ont été menés afin d'utiliser de l'apprentissage (souvent supervisé) pour identifier ou prévoir des événements tels que les éruptions solaires (e.g. projet H2020 FLARECAST), les CMEs, les traversées de magnétopauses, de chocs, de régions de reconnexion, les perturbations géomagnétiques (e.g. modèle SERENADE, ONERA)... Ces efforts permettent par leur automatisation de multiplier les observations de ces événements et ainsi d'augmenter leur statistique.

En plus de poursuivre ces efforts, deux autres thématiques prometteuses sont au cœur des préoccupations de la communauté du PNST :

- L'utilisation d'IA "physically-informed" dans les codes de simulations numériques pour accélérer les calculs en ne résolvant pas certaines régions dans lesquels la physique sous-grille sera résolue par IA ou en permettant un traitement sous maille efficace dans une approche large-eddy-simulation-subgrid scale modelling (LES-SGS+IA). L'IA peut aussi permettre de mettre en place des diagnostics "intelligents" en sélectionnant les domaines d'intérêt. Elle pourrait aussi gouverner la politique de raffinement dans les codes AMR.
- L'utilisation d'IA embarquées sur satellites pourrait permettre de sélectionner sans intervention humaine plusieurs aspects particulièrement intéressants pour les

problématiques du PNST : les événements transitoires à observer, le pilotage des instruments, leur mode de résolution, d'effectuer des calculs ou encore de sélectionner à bord les données à renvoyer par télémétrie.

6.6 Enseignement, communication, science participative

La communication vers le public, l'enseignement, le partage des savoirs et les sciences participatives vont jouer un rôle crucial pour l'attractivité des thématiques du PNST envers la prochaine génération de scientifiques et d'ingénieurs, et vers la société en général. Voici une prospective des activités d'enseignement qui façonneront cette communauté au cours des années 2024-2029.

- **Renforcer l'attractivité des thématiques PNST auprès des jeunes (public étudiant)**

Renforcement de la participation du PNST dans les programmes universitaires : les enseignants-chercheurs et enseignantes-chercheuses du PNST continueront à renforcer leurs programmes de cours dans le domaine des plasmas spatiaux et des relations Soleil-Terre. Des cours spécialisés seront proposés aux niveaux « undergraduate » et « graduate », couvrant des sujets tels que la physique des plasmas, la dynamique des particules chargées, l'interaction plasma/environnement et les technologies spatiales, l'électromagnétisme, entre autres. Ces programmes seront conçus pour offrir une formation multidisciplinaire, combinant la physique, l'ingénierie et les sciences de l'espace. Des projets numériques ou d'analyse de données peuvent être intégrés aux enseignements dès la première année de Licence, par exemple en intégrant les UE de méthodologie ou d'initiation à la recherche.

Développement des collaborations interdisciplinaires : la recherche dans le domaine de l'héliophysique nécessite une approche interdisciplinaire, intégrant des connaissances en physique, mathématiques, en ingénierie, en informatique et en sciences de l'environnement. Les activités d'enseignement refléteront cette réalité en encourageant la collaboration entre différentes disciplines. Les étudiants seront incités à participer à des projets de recherche interdisciplinaires, les exposant ainsi à un large éventail de compétences et de perspectives.

Développement de formations doctorales : la formation continue jouera un rôle essentiel dans le maintien de la compétitivité et de la pertinence des compétences acquises par les étudiants (et ainsi futurs chercheurs et ingénieurs) de notre communauté. Ces programmes offriront des cours spécialisés, des ateliers pratiques et des opportunités de réseautage, permettant aux participants de rester à jour avec les dernières avancées dans le domaine. Concrètement, la communauté du PNST continuera de proposer des formations dans les écoles doctorales concernées.

Promotion de la diversité et de l'inclusion : la communauté PNST s'engage à promouvoir la diversité et l'inclusion dans ses activités d'enseignement. Des initiatives seront mises en place pour encourager la participation des femmes, des minorités ethniques et des personnes sous-représentées dans le domaine. Par exemple, le PNST continuera de proposer des bourses pour participer aux colloques du PNST, et ses membres seront fortement encouragés à participer à des programmes de mentorat existants (par exemple le programme de mentorat Femmes & Sciences). Des événements spéciaux seront organisés pour soutenir et promouvoir la diversité au sein de la communauté, notamment lors des prochains colloques du PNST.

Mise en valeur de la dimension internationale des programmes : la coopération internationale jouera un rôle croissant dans les activités d'enseignement de la communauté PNST. Les partenariats établis avec des institutions étrangères, permettant aux étudiants français de participer à des échanges académiques et à des programmes de double diplôme seront promus par le PNST. Le PNST veillera à une participation aux écoles internationales, à la fois en tant qu'enseignants et en y inscrivant les étudiants du domaine. Pour cela, notre communauté pourra s'appuyer entre autres sur l'association européenne E-SWAN et les réseaux de communication européens comme la 'European Heliophysics Community' ou le 'ESA Heliophysics working group'.

- **Partage de la culture scientifique pour faire connaître les thématiques du PNST au grand public en France**

Conférences publiques : organiser des conférences publiques gratuites dans les villes et les centres communautaires pour présenter les concepts de base de la météorologie de l'espace, ses impacts sur les technologies et la société, ainsi que les dernières recherches et découvertes de la communauté PNST (héliosphère, planétologie, environnement de la Terre).

Ateliers éducatifs et outils « clés en main » : proposer des ateliers interactifs et éducatifs dans les écoles, les bibliothèques et les musées, où les participants peuvent apprendre les principes fondamentaux de la météorologie de l'espace, de l'héliophysique et des environnements ionisés des planètes à travers des démonstrations pratiques, des jeux et des expériences simples.

Expositions itinérantes : créer/mettre à jour/valoriser des expositions itinérantes sur la météorologie de l'espace, comprenant des panneaux d'information, des maquettes, des vidéos et des activités interactives, pour sensibiliser le grand public aux phénomènes spatiaux et à leur impact sur la Terre. Les « planeterrella » de la communauté PNST, qui permettent de reproduire des processus de type aurores polaires, doivent être davantage valorisées.

Observations publiques du ciel : la communauté PNST continuera de participer activement aux événements d'observation du ciel ouverts au public, où les participants peuvent utiliser des télescopes pour observer le Soleil, les éruptions solaires, les aurores et d'autres phénomènes liés à la météorologie de l'espace, tout en recevant des explications sur leur origine et leur fonctionnement.

Camps scientifiques pour les jeunes : avec la nouvelle obligation pour les lycéens de Seconde d'effectuer deux semaines de stage de découverte en entreprise à la mi-juin, la communauté PNST doit envisager d'organiser des camps scientifiques d'été pour les jeunes, où ils peuvent découvrir nos thématiques à travers des activités ludiques, des jeux de rôle, des expériences pratiques et des rencontres avec des chercheurs et des professionnels du domaine.

Production et projection de films et documentaires : produire et organiser des projections de films et de documentaires sur l'héliophysique, la météorologie de l'espace, les magnétosphères planétaires dans les cinémas, les centres culturels et les écoles, suivies de discussions animées avec des experts pour approfondir les connaissances et répondre aux questions du public.

Renforcement de la participation du PNST aux actions nationales de formation des enseignants (plus de participations aux activités du CLEA, Cahiers Clairaut, Maisons Pour la Science, formation initiale et continue des professeurs).

Soutien à l'édition, la publication et/ou la traduction de livres 'Grand public' couvrant les thématiques de PNST.

Le PNST pourra également relayer auprès de la communauté les offres de formations aux relations avec les médias organisés par les universités et le CNRS. Les collaborations « pro-amateurs » liées aux thématiques du PNST doivent pouvoir être soutenues dans leurs développement et leur organisation, et méritent également un éclairage particulier pour valoriser l'impact sur le public.

- **Impact sociétal du PNST**

Les chercheurs et chercheuses du PNST assument une responsabilité sociétale importante, intégrant plusieurs notions clés pour répondre aux défis contemporains. Tout d'abord, ils encouragent un esprit critique chez le grand public afin de distinguer les faits scientifiquement étayés des fausses informations et des théories non fondées, particulièrement dans un contexte où les « fake news » se répandent facilement. Un point d'attention particulier porte sur les « fake news » liées au réchauffement climatique, pour insister sur le rôle très limité du Soleil dans ce phénomène, en mettant en lumière l'importance de comprendre les interactions entre l'activité solaire et le climat terrestre. En effet, le consensus scientifique est que les activités humaines, telles que les émissions de gaz à effet de serre résultant de la combustion des combustibles fossiles, sont la principale cause du réchauffement climatique observé au cours des dernières décennies et non l'activité solaire. Le PNST s'engage, dans

la continuité de ces efforts, à lutter contre la désinformation scientifique concernant les origines du changement climatique.

Le PNST promeut une science inclusive en s'engageant à encourager la participation des femmes dans le domaine, ainsi que toutes les minorités (ethniques ou autres), reconnaissant ainsi la valeur de la diversité des perspectives et des talents.

Enfin, le PNST contribue au renforcement de la culture générale scientifique en fournissant des informations accessibles au public sur les avancées de la recherche, les applications pratiques de la physique des plasmas spatiaux, de la météorologie de l'espace et leurs impacts sur notre planète et notre société. Les thématiques du PNST sont parmi les sciences de l'univers celles qui ont les liens les plus forts avec le développement industriel. En combinant ces aspects, les chercheurs du PNST jouent un rôle crucial dans la promotion de la compréhension scientifique, l'engagement sociétal et la lutte contre les défis contemporains.

En conclusion, l'exercice de prospective du PNST est caractérisé par un engagement envers l'excellence académique, l'interdisciplinarité, la diversité et l'internationalisation. Ces initiatives contribueront à former une nouvelle génération de leaders dans le domaine, prêts à relever les défis scientifiques et technologiques liés à l'exploration spatiale, à l'instrumentation sol et aux enjeux de la météorologie de l'espace.

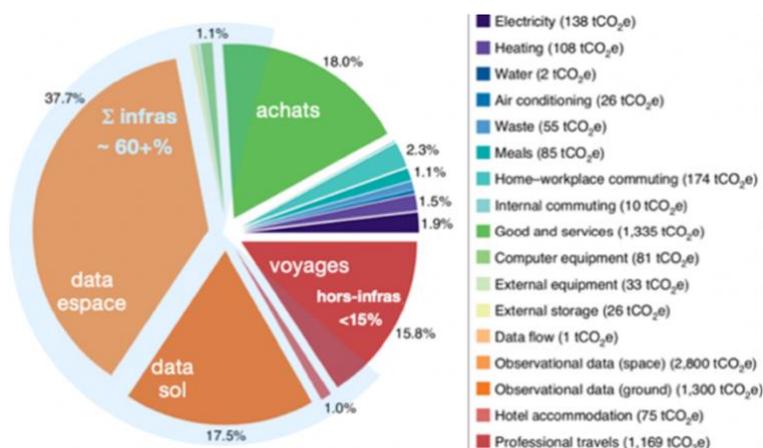
6.7 Impact environnemental

La réduction de l'empreinte carbone de la recherche est **un enjeu majeur** qui s'inscrit à toutes les échelles dont celle du PNST. Lors de son colloque de prospective, le PNST a discuté de la trajectoire permettant ainsi d'arriver aux objectifs fixés par les tutelles en termes de réduction des empreintes carbone de notre discipline.

Une partie de la réflexion s'appuie sur les travaux du Labo1.5 et sur le bilan carbone de l'IRAP (cf.

la figure ci-contre), qui montrent que **l'empreinte carbone des infrastructures de recherche** en astrophysique est d'au moins 50%, et qu'elle dépasse les 60% lorsqu'on prend en compte les achats et des déplacements dédiés à la préparation au fonctionnement de ces infrastructures.

Conscient que des **actions concrètes, autant collectives qu'individuelles**, sont nécessaires, plusieurs pistes ont été évoquées : mise en place d'ateliers de sensibilisation pour les nouveaux entrants, reconnaissance de l'investissement des chercheurs sur ce sujet lors de leurs évaluations individuelles, prise en compte du développement soutenable lors de l'évaluation et les financements des propositions de recherche par le conseil scientifique du PNST en encourageant l'éthique personnelle, mise en place de quotas sur les déplacements professionnels, meilleure réutilisation des données disponibles et développement des plans de gestion de données, optimisation des codes numériques à travers la formation des personnels, allongement de la durée de vie des infrastructures de recherche avec prise en compte dès leur conception, réduction du nombre de missions spatiales.



7. Le PNST : des chiffres et des lettres

7.1 Composition du conseil scientifique 2020-2024

- Direction bicéphale :
 - Directeur : *Benoît Lavraud* (LAB) à partir d'Avril 2023
Pierre-Louis Blelly (IRAP) jusqu'en Mars 2023
 - Président : *Guillaume Aulanier* (LPP)

La direction du programme a toujours fonctionné en tandem sur la plupart des sujets, et s'est traditionnellement réparti les tâches suivantes : les aspects budgétaires et organisationnels *un peu plus* dans le périmètre du directeur ; et les aspects scientifiques et de représentation *un peu plus* dans le périmètre du président.

- 15 membres du CS :
 - *Olga Alexandrova* (LESIA)
 - *Nicolas André* (IRAP)
 - *Lionel Bigot* (Lagrange)
 - *Eric Buchlin* (IAS)
 - *Jean-Yves Chaufray* (LATMOS)
 - *Thomas Farges* (CEA DAM)
 - *Lina Hadid* (LPP)
 - *Pierre Henri* (LPC2E et Lagrange)
 - *Dimitra Koutroumpa* (LATMOS)
 - *Jean Lilensten* (IPAG)
 - *Vincent Maget* (ONERA)
 - *Etienne Pariat* (LPP)
 - *Illya Plotnikov* (IRAP)
 - *Roch Smets* (LPP)
 - *Antoine Strugarek* (CEA AIM)

Les membres du CS ont été régulièrement sollicités par la direction. Non seulement en tant que commission d'attribution des moyens sur l'appel d'offre INSU-AA annuel, mais aussi (et surtout) voire surtout pour préparer ou donner des avis sur de nombreux dossiers, tels que le montage de propositions des médailles du CNRS, les statuts du SCOSTEP-France, la prospective autour de plusieurs infrastructures d'observation au sol, l'organisation de sessions scientifiques et prospectives aux colloques de la SF2A et du PNST, et encore plus important bien sûr les travaux de bilan et de prospective du PNST.

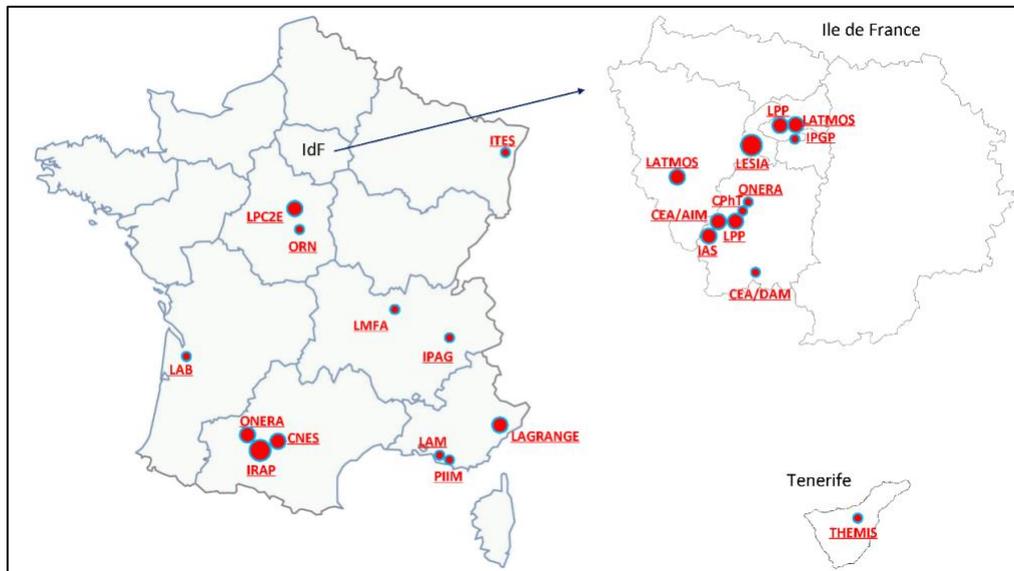
- Invités réguliers du CS :
 - INSU : *Aurélie Marchaudon* (IRAP - chargée de mission INSU)
 - CNES : *Matthieu Kretzschmar* (LPC2E - président GT SHM)
Kader Amsif (CNES - thématicien SHM)
 - CEA : *Stéphane Mathis* (CEA AIM - chef LDE3)

Les invités réguliers du CS sont les représentants de l'INSU et des partenaires qui contribuent au financement du PNST.

Sur 17 membres du CS, incluant la direction, il n'y a eu que 17,6% de femmes durant la mandature 2019-2024. Ce chiffre est légèrement inférieur à la moyenne nationale du PNST (cf. section 7.4. ci-dessous).

7.2 Les laboratoires de la discipline 2019-2023

Les équipes du PNST sont répartis dans une grosse vingtaine de « laboratoires ». Leur liste et leur localisation géographique sur le territoire national sont indiquées ci-dessous.



- | | | |
|------|----------------|---|
| [1] | CEA AIM | Astrophysique Instrumentation Modélisation |
| [2] | <i>CEA DAM</i> | <i>Direction des Applications Militaires</i> |
| [3] | CNES | Centre National d'Etudes Spatiales – Toulouse |
| [4] | CPhT | Centre de Physique Théorique |
| [5] | IAS | Institut d'Astrophysique Spatiale |
| [6] | IPAG | Institut der Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble |
| [7] | IPGP | Institut de Physique du Globe de Paris |
| [8] | IRAP | Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie |
| [9] | ITES | Institut Terre et Environnement de Strasbourg |
| [10] | LAB | Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux |
| [11] | Lagrange | Laboratoire Joseph-Louis Lagrange |
| [12] | LAM | Laboratoire d'Astrophysique de Marseille |
| [13] | LATMOS | Laboratoire Atmosphères, Observations Spatiales |
| [14] | LESIA | Laboratoire d'Études Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique |
| [15] | LMFA | Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique |
| [16] | LPC2E | Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement et de l'Espace |
| [17] | LPP | Laboratoire de Physique des Plasmas |
| [18] | <i>ONERA</i> | <i>Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales</i> |
| [19] | <i>ORN</i> | <i>Observatoire Radioastronomique de Nançay</i> |
| [20] | PIIM | Physique des Interactions Ioniques et Moléculaires |
| [21] | <i>THEMIS</i> | <i>Télescope Héliographique pour l'Étude du Magnétisme et des Instabilités Solaires</i> |

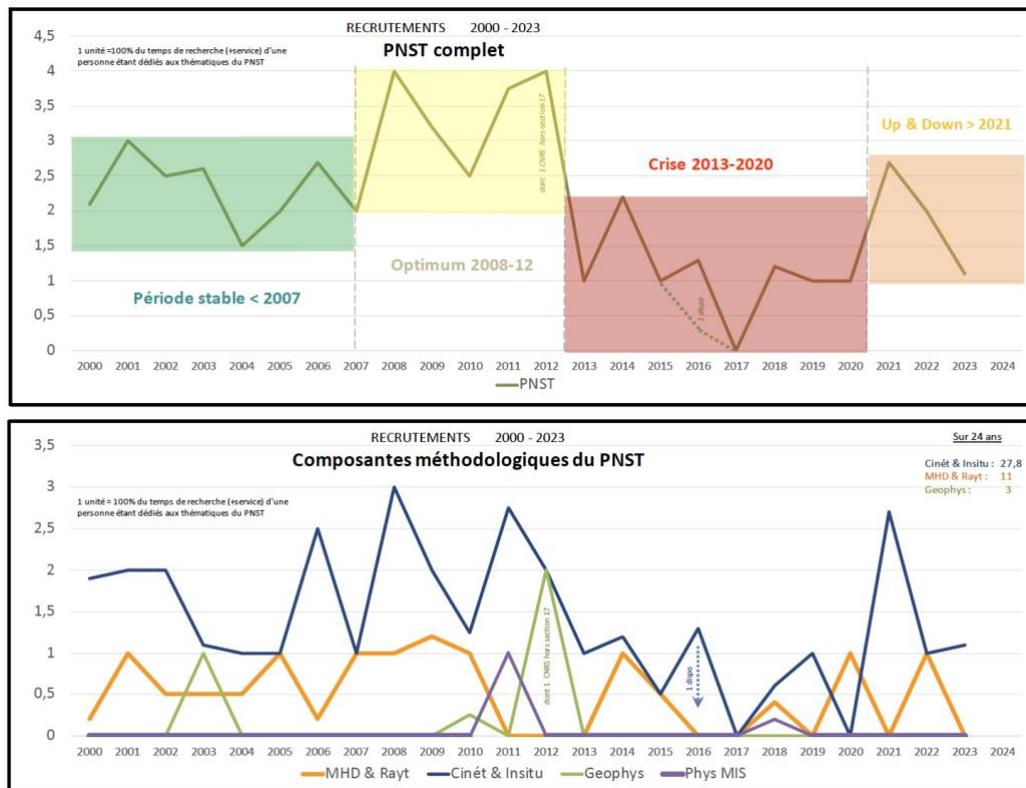
La plupart de ces laboratoires sont des UMR. Mais d'autres (indiqués en italique ci-dessus) ont d'autres statuts : des établissements dont le PNST ne voit pas la granularité ; une direction spécifique au sein d'un EPIC ; un service scientifique dans un observatoire ; et un télescope rattaché à un laboratoire international entre l'Institut d'Astrophysique des Canaries et la France (l'IRL FSLAC).

7.3 Recrutements et tendances 2000-2023

Le PNST a procédé à un bilan de ses recrutements sur les 24 dernières années pour en étudier la dynamique et les tendances à long terme.

Les deux figures ci-dessous offrent un résumé des analyses qui peuvent en être faites. Y sont indiquées les fractions d'ETP recrutés consacrés au PNST par les chercheuses et les chercheurs au moment de leur recrutement. A titre d'exemple, un collègue faisant sa recherche entièrement dans le périmètre du PNST y compte pour 1, qu'il soit chercheur ou enseignant-chercheur, et n'y compte que

pour 0,5 s'il fait, par exemple, 50% de recherche dans un autre domaine qui n'est pas dans le périmètre du PNST (par exemple le stellaire, les rayons cosmiques, etc...). Ce mode de comptage explique les fractions non-entières d'ETP. Aussi dans la figure du bas, le PNST a été séparées (de façon approximative) en grandes composantes et permettent de voir leur dynamique respective.



On peut d'abord voir qu'après une période de recrutement stable précédent 2007, le PNST a vécu une période de recrutements, de bon niveau et relativement constant, pendant 5 ans sur 2008-12, et peut-être en lien avec la dynamique engendrée par la mission Cluster de l'ESA. On voit ensuite que cet optimum s'est suivi d'une **crise du recrutement pendant 8 ans sur 2013-2020**, dont le PNST ne s'est toujours pas remis. En effet, la situation depuis 2020 ne s'est toujours pas re-stabilisée en comparaison de la situation d'avant 2007. Hormis un pic de recrutement en 2021, **cette crise menace même de perdurer** puisqu'il n'y a pas eu de recrutement au CNAP en 2023 ni en 2024, ni de recrutement au CNRS en 2024.

Une analyse plus fine révèle que, depuis une bonne quinzaine d'années, les recrutements :

- i. se font **majoritairement sur la thématique des magnétosphères planétaires** – qui est maintenant devenue une composante majeure du programme, avec un lien synergique très fort avec le PNP ;
- ii. sont **en forte chute pour la thématique solaire remote-sensing** – qui est en train de se réduire dangereusement dans plusieurs laboratoires du PNST, alors que l'activité magnétique du Soleil est à l'origine de toutes les perturbations en météorologie de l'espace ;
- iii. sont devenus **quasi-inexistants dans la thématique ionosphérique** (hormis quelques-uns au CEA, à l'ONERA, et à l'IPGP) – au point que cette thématique est en danger d'extinction au CNRS et dans les universités alors qu'elle est au cœur des préoccupations de la météorologie de l'espace puisqu'au plus proche de nous.

Si d'une part le PNST se félicite de la dynamique autour du planétaire et du développement des collaborations aux interfaces associées, d'autre part il paraît impératif d'inverser les tendances pour les points ii. et iii. La raison est double. D'abord ce sont des thématiques phares du programme avec des équipes mondialement reconnues. Ensuite ils sont au cœur de l'objectif de l'INSU de développer les

applications sociétales, puisqu'elles constituent le début et la fin de la chaîne de la météorologie de l'espace. **Soutenir tous ces axes ne pourra se faire qu'en** sortant définitivement de la période de crise 2013-2020+ en **revenant à un recrutement d'au moins 2 chercheurs par an** sur les différents concours, et avec un rattrapage nécessaire de la période de crise.

C'est malheureusement mal engagé en cette fin de quinquennal, vu l'absence de recrutement pour le PNST non seulement CNAP en 2023 et en 2024, mais aussi au CNRS en 2024. Il est possible que cette difficulté provienne du fait que les approches physiques et observationnelles du PNST, sont parfois plus proches de la géophysique que de l'astrophysique. On a pu constater dans plusieurs cadres que cela conduit souvent à **des incompréhensions avec des jurys ou des panels à dominante astrophysique**, au sujet de nos enjeux et nos méthodologies. Améliorer ce dialogue est sûrement un enjeu majeur.

Le suivi du recrutement des femmes au PNST montre aussi de fortes variations. Ce taux a été relativement faible sur une période d'une quinzaine d'années sur 2000-2014, de l'ordre de 17%, faisant suite à une période où il y a eu de nombreuses femmes de rang A au PNST. Ce « trou d'air » a eu deux effets. D'abord il a fait que **la part des femmes n'est plus que de 19,7 % des chercheur permanents**, alors qu'il était autrefois bien plus élevé. Ensuite, il fait que le PNST manque maintenant de femmes dans la tranche d'âge où les chercheurs et chercheuses acceptent traditionnellement de siéger dans des commissions (comme le CS du PNST, et d'autres). Cela pose d'ailleurs plusieurs problèmes de représentation du PNST ici et là. Ce problème ne pourra se résoudre qu'avec le temps, et avec le retour à un recrutement moins déséquilibré qu'il n'a pu l'être dans la période 2000-2014. De fait, ce processus est déjà (plus que) engagé. Depuis le dernier exercice de prospective, c'est-à-dire sur la période **2019-2023, les femmes représentent 66% des chercheurs et enseignants-chercheurs recrutés** au PNST

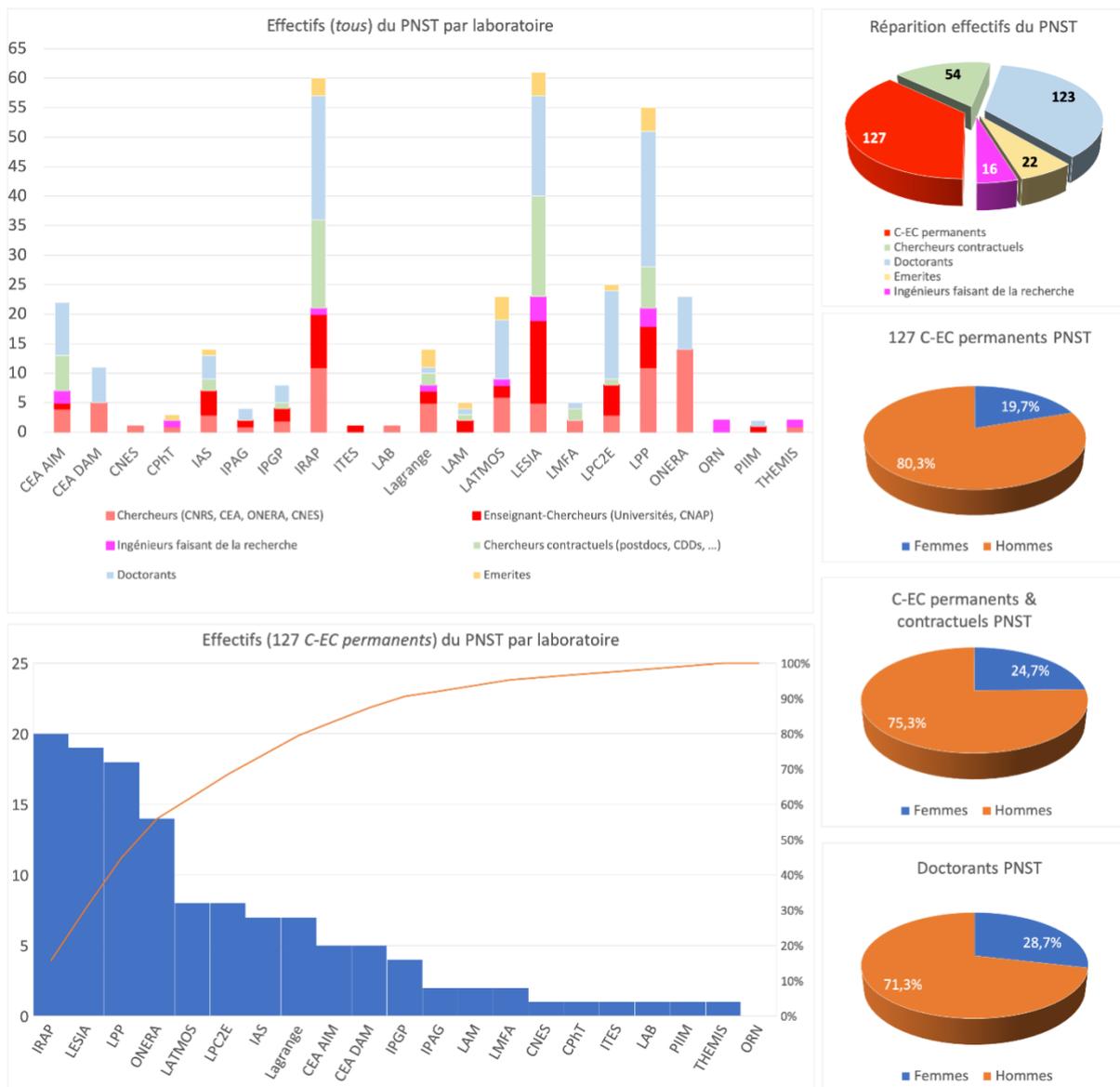
7.4 Photographie de la communauté-recherche nationale 2019-2023

Le recensement de la *communauté-recherche* PNST **intégré sur la période 2019-2023** a concerné tous les chercheurs et enseignants-chercheurs permanents (de statut CNRS, CEA, CNES, Universités, CNAP-Astronomes, et quelques CNAP-Physiciens), les chercheurs contractuels (principalement les postdocs, et quelques CDD), et les doctorants. Pris de façon globale sur toute la communauté nationale, on constate que **les C-EC permanents représentent 127 personnes**. Ce nombre est à part égale avec celui des doctorants, et un peu plus du double de celui des post-docs, non pas pris sur un instantané mais étendu sur une période de 5 ans.

Le PNST a aussi tenu à inclure deux autres populations. D'une part les émérites, puisqu'ils contribuent activement à la recherche. Et d'autre part les ingénieurs qui effectuent de la recherche en physique des plasmas solaires et spatiaux, ou bien de la recherche instrumentale et technologique, et qui publient leurs propres travaux de recherche ou qui sont coauteurs pour leurs propres contributions directes à ces sujets de recherche. Pris ensemble, **les émérites et les "ingénieurs faisant de la recherche" représentent 38 personnes**.

Chercheurs (CNRS, CEA, ONERA, CNES)	Enseignants- Chercheurs (Universités, CNAP)	Chercheurs contractuels (postdocs, CDDs)	Doctorants	Émérites	Ingénieurs faisant de la recherche	TOTAL
76	51	54	123	22	16	342

L'analyse par laboratoire révèle des variations d'un endroit à l'autre. On peut diviser les laboratoires du PNST en trois grands groupes. [i] D'abord les **4 gros labos qui ont de 14 à 20 C-EC permanents**. Ce sont les plus gros, aussi bien en nombre de permanents que de personnels au total. Il s'agit du LESIA, de l'IRAP, du LPP, et de l'ONERA. [ii] Ensuite les **6 labos moyens qui ont 5 à 8 C-EC permanents**. Il s'agit du LATMOS, du LPC2E, de l'IAS, de Lagrange, du CEA AIM et du CEA DAM. [iii] Finalement, **les 11 petits labos qui ont moins de 5 C-EC permanents**. Ce sont l'IPGP, le LAM, le LMFA, le CNES, le CPhT, l'ITES, le LAB, le PIIM, THEMIS, l'IPAG, et l'ORN.



Un autre élément à considérer est la place des femmes dans la communauté PNST, notamment dans la contexte du « trou d'air » de la période 2000-2014 évoqué précédemment dans la section 7.3, et aussi sachant que le nombre de femmes de rang A au début des années 2000 était relativement élevé dans la communauté.

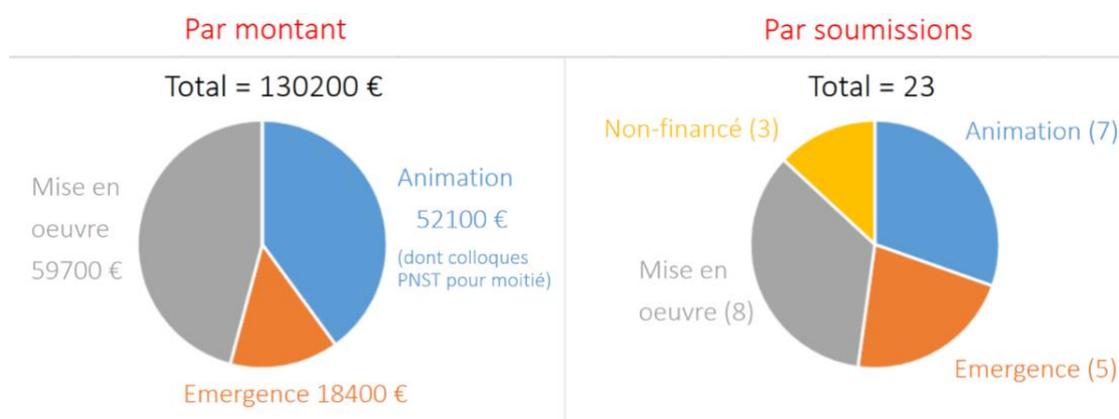
L'analyse du recensement fait sur la période 2019-2023 indique que **la part des femmes parmi les C-EC permanents du PNST est de 19,7%**. Donc au PNST, un peu moins d'un chercheur sur cinq est une chercheuse. La communauté PNST est donc moins féminisée que la moyenne nationale en astronomie, où « Les femmes représentent 23% des chercheurs et enseignants-chercheurs en poste permanent en Astronomie et Astrophysique en France » (Bot & Buat, 2020).

On voit aussi que ce chiffre inférieur à 20% pour les seuls permanents (ne) monte (que) à presque 25% quand on inclue les chercheurs contractuels dans la statistique, ce qui reste relativement bas.

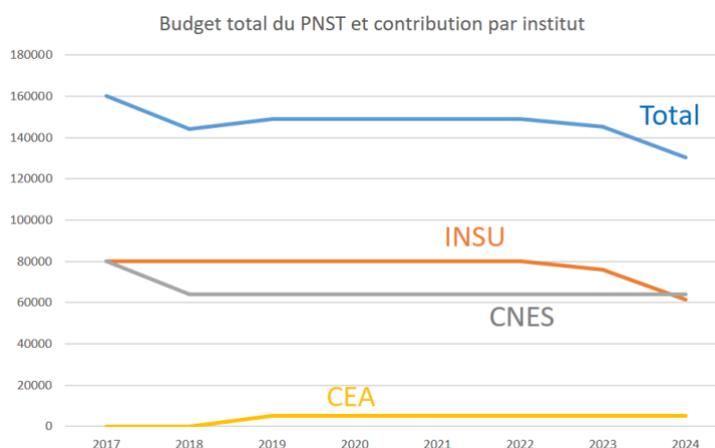
Parmi les doctorants il y a eu presque 29% de femmes sur la période 2019-2023. Cela indique peut-être une meilleure attractivité de la discipline pour les étudiantes, et donc un potentiel vivier de futures candidates aux concours C-EC. Le PNST se réjouit d'ailleurs du **recrutement d'une C-EC femme par an pendant la période 2019-2023**.

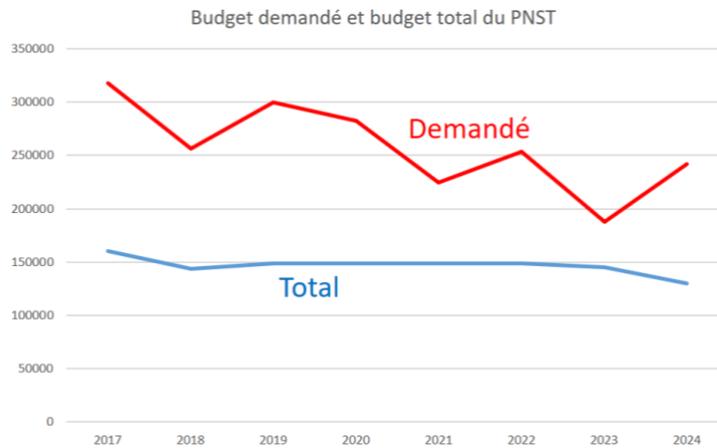
7.5 Budget et partenaires du PNST

A travers l'AO INSU, le PNST finance chaque année un certain nombre de propositions de recherche (23 en 2024). Ces propositions de recherche peuvent être de différents types, à savoir 1) d'**animation** (soutien à des événements scientifiques ou vers le grand public, essentiellement), 2) de **mise en œuvre de la prospective** (c'est-à-dire de soutien aux thématiques scientifiques identifiées comme prioritaires dans la – ou les – prospectives précédentes), ou 3) de soutien à des **thématiques émergentes**. Bien que ce ne soit pas un critère explicite, les demandes comme les financements vont le plus largement vers les propositions qui n'ont pas de soutien significatif de la part du CNES (en lien avec les missions spatiales). La figure ci-dessous montre la répartition en nombre et en montant financé, par type de demande, pour l'AO INSU 2024. Cette répartition permet la mise en œuvre des priorités, mais sans oublier de financer les thématiques émergentes aussi bien en nombre qu'en enveloppe budgétaire. L'animation prend une part importante, mais il doit être noté que l'organisation des colloques du PNST (deux par quinquennat) constitue près de la moitié de ce financement.



L'évolution des sources de financement et des demandes faites au PNST depuis l'AO INSU 2017 est présentée dans la figure ci-dessous. On y observe une première chute en 2018 du financement global, puis un plateau d'environ 6 ans avant une nouvelle diminution significative au cours des deux dernières années de la contribution de l'INSU (celles du CNES et du CEA restant constantes sur cette période). La figure de droite montre une diminution globale du volume des demandes sur cette période, avec un « trou » de 2021 à 2023 certainement lié à la COVID. On observe un rebond des demandes lors du dernier AO 2024, qui reste à confirmer sur les prochaines années. Ces tendances permettent un maintien global du rapport de pression, mais celui-ci risque d'augmenter significativement dans les années à venir si les dernières tendances se confirment (baisse ou maintien au bas niveau actuel des financements INSU, mais rebond des demandes).

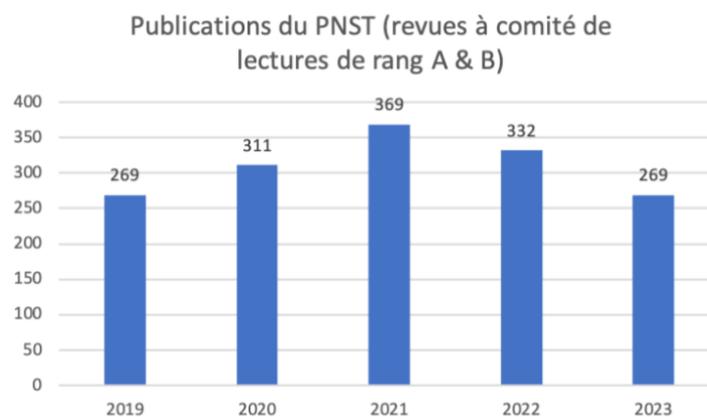




Afin de pallier à cette possibilité, une augmentation du financement de la part de l'INSU est nécessaire, d'autant que paradoxalement la contribution du CNES est à présent plus élevée que celle de l'INSU. Des soutiens financiers supplémentaires auprès d'autres instituts sont aussi actuellement en discussion.

7.6 Publications 2019-2023

Au cours de la période 2019-23 la communauté PNST a publié 1 550 articles dans des revues à comité de lecture (recueillies via HAL et NASA ADS). Soit une moyenne de 310 articles par an.



Compte-tenu du fait que la communauté comprend 143 permanents qui font de la recherche (127 chercheurs et enseignants-chercheurs (C-EC) et 16 ingénieurs faisant de la recherche), et en supposant que tous les doctorants, les post-doctorants, et les émérites, publient avec au moins un permanent, alors on peut compter que la production est de 2,16 articles par an par personnel permanent faisant de la recherche (2,44 si on ne prenait en compte que les C-EC).

Ce chiffre de 310 publications par an est légèrement supérieur celui de la période précédente 2014-18, mais reste comparable par exemple à la période 2006-2009. Il est cependant difficile de comparer ces différentes périodes sans faire une analyse démographique et bibliographique détaillée. On peut néanmoins noter que les 3 années 2020-21-22 sont particulièrement hautes. On y retrouve notamment l'effet de nombre des premières publications des consortiums des grandes missions spatiales Parker Solar Probe, Solar Orbiter et Bepi Colombo.

La liste complète des publications sur la période 2019-23, recueillies par le conseil scientifique du PNST, est accessible sur https://pnst.ias.u-psud.fr/fr/bilan_activite_et_prospective.

8. SWOT du PNST

<p style="text-align: center;">Forces</p> <ul style="list-style-type: none"> • Communauté soudée et unie, autour la physique de l'héliosphère et des plasmas. • Recherche fondamentale sur les plasmas ayant de nombreuses applications (et donc des interfaces) dans d'autres domaines de la physique et l'astrophysique. • Diversité des régimes physiques et des méthodes d'observation. • Forte reconnaissance internationale des équipes instrumentales (sur toutes les missions de la discipline) et théoriques (sur de nombreuses collaborations). • Communauté des magnétosphères planétaires nombreuse au sein du PNST, sélectionnée sur de très nombreuses missions. • Lien fort avec les agences spatiales et proximité du CNES en particulier. 	<p style="text-align: center;">« Faiblesses »</p> <ul style="list-style-type: none"> • Difficulté pour les équipes techniques de maintenir des activités de R&T : manque de recrutement ITA en comparaison des implications instrumentales qui restent élevées. • Équipes scientifiques et équipes techniques souvent petites dans les laboratoires. • Crise du recrutement pendant 8 ans sur 2013-2020, hauts et bas depuis, sortie toujours pas consolidée. • Déficit de femmes HDR & rang A: seulement 17% de femmes parmi les C-EC recrutés en 15 ans sur la période 2000-2014. • Certaines communautés sont devenues très peu nombreuses et ont très peu de recrutements (surface solaire, ionosphère, chocs non-collisionnels, héliosphère lointaine). • Approches physiques et observationnelles parfois plus proches de la géophysique, amenant quelques incompréhensions avec l'astrophysique sur nos méthodologies.
<p style="text-align: center;">Opportunités</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lien fort avec une application sociétale qui peut être encore renforcée : la météorologie de l'espace. • Trouver le bon niveau d'interfaçage entre la recherche fondamentale en amont dans les UMR & les besoins en services à TRL élevé souhaités par les agences qui financent la météorologie de l'espace. • Ouvertures aux plasmas non héliosphériques à développer : étoiles, exoplanètes, laboratoires, MIS... • Participation aux missions (« flagship » en particulier) qui seront issues du « decadal survey on space et solar physics » en cours aux USA. • Intérêt scientifique de la communauté solaire pour l'exploitation du European Solar Telescope (EST). • Les contraintes sur les émissions de gaz à effet de serre incitent à développer et à utiliser des technologies et des ressources moins énergivores, et à optimiser les besoins pour être plus raisonnables dans les achats de matériels et les déplacements. 	<p style="text-align: center;">Menaces</p> <ul style="list-style-type: none"> • Le manque de R&T (manque de recrutement ITA) amènera à une obsolescence des capacités de propositions instrumentales. • Communauté solaire remote-sensing sol et espace en danger, peu de recrutements depuis 15 ans ; menaces d'extinction des expertises dans plusieurs spécialités. • Extinction de la recherche académique sur l'ionosphère, avec des conséquences sur les activités en météorologie de l'espace, les liens avec l'ESA, le CNES, la DGA... • Multiplication des AO issus d'agences de financement pour la météo de l'espace exclusivement dédiés à la production d'applications et de livrables opérationnels, aux dépens du financement de la recherche fondamentale et à bas TRL en amont. • Des réductions drastiques dans les déplacements en avion et/ou dans les investissements dans les infrastructures de recherche, qui seraient motivées par l'importance des efforts de la recherche fondamentale dans la lutte contre le changement climatique, sont susceptibles de menacer une des forces communes à la majorité des équipes scientifiques du PNST : leur reconnaissance et leur implication à l'international.