

G. Aulanier et B. Lavraud, avec la participation du CS
le 3 avril 2024

1. Identité et grandes questions thématiques du PNST :

Le PNST décline les grandes questions scientifiques de la discipline selon 4 approches distinctes mais complémentaires, à l'image de la communauté et des projets internationaux.

a) *Par l'étude d'objets astrophysiques :*

- Le **Soleil magnétique** – son intérieur, ses interfaces et son atmosphère ;
- Le **vent solaire** – depuis sa naissance au Soleil et jusqu'aux confins de l'héliosphère ;
- Les **magnétosphères** – incluant les ionosphères, celles de la Terre, des planètes, des exoplanètes ;
- L'**héliosphère** – jusqu'à son interaction avec le milieu interstellaire.

b) *Par la physique fondamentale des plasmas :*

- Comment fonctionne la **dynamo**, le **cycle** solaire et le processus d'**émergence de flux** magnétique ?
- Comment se déclenchent les **instabilités** et les **couplages d'échelle** dans les plasmas héliophysiques ?
- Quels sont les effets de physique atomique sur l'**ionisation**, le **transfert radiatif**, et la **polarisation** de la lumière ?
- Quels sont les mécanismes d'**accélération** des **particules** et de dissipation d'**énergie** par les **chocs**, la **reconnexion** magnétique, les **ondes** et la **turbulence** ?

c) *Par l'approche systémique, globale :*

- Comment l'**activité magnétique**, des **taches** aux **éruptions solaires**, est-elle générée ?
- Quelles sont les **origines** et la **nature** de l'**accélération** et des **perturbations** du **vent solaire** ?
- Comment les **magnétosphères** et les **enveloppes ionisées** de la Terre et des planètes **répondent à ces forçages**, comment s'y déclenchent les **événements impulsifs** ?
- Quels sont les mécanismes locaux et globaux qui **structurent l'héliosphère** et son interaction avec le milieu interstellaire ?

d) *Par les applications sociétales avec la météorologie de l'espace :*

- 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**) ?
- Quel est l'**impact** des perturbations solaires (lumière, particules énergétiques, CME et vent solaire) sur les activités **géomagnétiques**, **atmosphériques**, et **humaines** ?
- Quelles sont les évolutions à long terme qui régissent la **climatologie de l'espace** ?

2. Moyens associés et priorités programmatiques du PNST :

a) *Les infrastructures d'observation :*

Les activités du PNST font usage de nombreuses ressources et infrastructures observationnelles. En termes d'instrumentation sol, les priorités de notre communauté sont de trois types :

- P0 - Surveillance/observation solaire : surveillance radio à Nançay (**NRH** et **ORFEES** pour le Soleil ; **NDA** pour le Soleil et Jupiter), le télescope solaire **THEMIS (Canaries)**, le **Spectrohéliographe de Meudon** et **Meteospace**, et les observations ionosphériques de **SuperDARN** (Iles Kerguelen).

- P0 - Exploitation scientifique des données issues du futur European Solar Telescope (**EST**) (format « science ready »).

- P1 – Instruments non-dédiés PNST et en mode campagnes d’observation, en particulier sur Jupiter et le Soleil (e.g. **NenuFAR**).

Dans le volet des missions spatiales, celles dont l’exploitation a été une priorité pour notre communauté lors de ces dernières années, et le resteront pour beaucoup, sont **SoHO, Cluster, STEREO, SWARM, THEMIS (NASA), SDO, MAVEN, MMS, Juno, Parker Solar Probe, Bepi Colombo, Solar Orbiter**, et plus récemment **JUICE** en premier lieu. 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, à savoir (*liste principale, mais non exhaustive*) :

- **Comet Interceptor** de l’ESA (lancement 2029), dédiée à l’exploration d’une comète primitive,
- **SOLAR C** (lancement prévu 2028, engagement final de la JAXA en attente) dédiée à l’étude de la dynamique de l’atmosphère solaire à très haute résolution : contribution de la France au spectroscopie EUV.
- **HelioSwarm** (lancement 2029, sélectionnée par la NASA) dédiée aux mesures multi échelles fluides et ioniques simultanées : contribution forte de la France pour 2 des 4 instruments
- Nouvelles priorités majeures :
 - Phases A de l’appel M7 « medium class » de l’ESA : **Plasma Observatory** (processus d’accélération dans les plasmas héliosphériques) et **M-Matisse** (étude multipoints de l’environnement martien).
 - **VIGIL** (programme S2P ESA, contribution française probable à l’imageur UV) : mise en place d’une surveillance en météorologie de l’espace au point de Lagrange L5.
 - **Mission flagship du « Decadal Survey » de planétologie** des US dédiée à l’exploration d’Uranus.
 - **Mission flagship qui sera sélectionnée lors du « Decadal Survey » de Physique solaire et spatiale** des US en cours cette année, qu’il s’agisse d’une mission solaire, magnétosphérique ou d’exploration de l’héliosphère externe.

Les thématiques scientifiques liées à la magnétosphère interne, ainsi qu’aux interactions entre les différentes enveloppes terrestres (ionosphère, mésosphères, etc.) sont aussi une des priorités de la communauté. Elles font l’objet de plusieurs études de contributions instrumentales auxquelles plusieurs équipes du PNST participent, avec au moins trois projets liés à des programmes spécifiques de l’ESA (comme NanoMagSat), et un de la NASA.

b) Les infrastructures numériques :

Le PNST exploite beaucoup de ressources numériques, que ce soit au niveau de la gestion de **bases de données** que de le développement et l’exploitation de **nombreux codes numériques**, deux sujets sur lesquels le PNST met autant d’efforts et a autant de reconnaissance internationale que sur le sujet des infrastructures d’observation :

- Deux **pôles thématiques nationaux MEDOC et CDDP** associées aux missions spatiales (bases de données et exploitation associée) ;
- Plusieurs plus petites bases de données, notamment celles associées à des instruments sol, et des serveurs pour des outils dédiés à la météorologie de l’espace ;
- Ressources HPC du **GENCI** à l’échelle nationale et plusieurs **méso-centres régionaux** pour la simulation numérique – avec des problématiques physiques et algorithmiques communes qui en font un des liens du PNST– et avec des approches spécifiques aux différentes composantes de la communauté, en particulier « plasmas in-situ » et « observations remote-sensing », notamment : **MHD ; hybride ; particle-in-cell ; centre guide ; Vlasov ; transfert radiatif** ; etc.

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.

c) *Les SNO :*

Les SNO du PNST sont **nombreux**, ils sont regroupés dans l'ANO2 (lié à la préparation et aux opérations des instruments), l'ANO5 (liés aux bases de données, notamment BASS2000, MEDOC et le CDP), et l'ANO6 qui est une spécificité du PNST (instruments de surveillance et services en météorologie de l'espace).

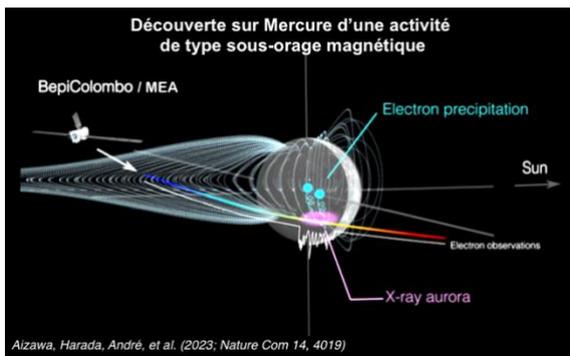
Une réflexion en cours dans la communauté porte sur le **regroupement** d'un certain nombre des « petits » SNO, non pas tant pour en accroître la taille que pour en faciliter le pilotage, et pour les rendre moins sensibles aux aléas conjoncturels qui peuvent toucher un instrument donné, une base de données ciblée, ou un outil spécifique. La réflexion envisage actuellement des regroupements classiques **par mission**, mais aussi **par filière technique**, et dans le cadre de l'ANO6 par **objectif** (par exemple le calcul et la mise à disposition de mesures ou indices, la surveillance du Soleil, de l'ionosphère, etc.).

La communauté PNST travaille aussi au développement de plusieurs grands codes ayant vocation à devenir communautaire et à faire l'objet de labellisations dans l'ANOCC, notamment **Dyablo** et **PHARE**.

3. Résultats marquants du PNST sur 2019-2023 :

Le PNST a choisi deux faits saillants représentatifs en termes de régime physique et de méthodologie d'observation, à savoir via sa composante « **plasmas in-situ** » et sa composante « **observations remote-sensing** ». Incidemment, ces deux faits saillants s'inscrivent dans le sujet de la **météorologie de l'espace**.

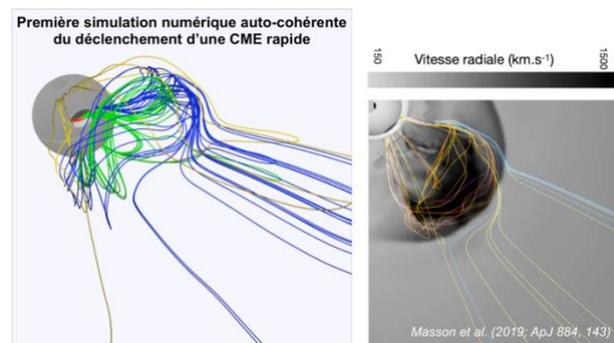
1. Découverte sur Mercure d'une activité de type sous-orage magnétique



Les observations des analyseurs d'électrons à **Mercury** 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.

S. Aizawa, et al. (2023, Nature Com)

2. Première simulation numérique auto-cohérente du déclenchement d'une CME rapide



Aucune simulation MHD précédente du déclenchement des éruptions **solaire** 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 **NRH** et spatiales **STEREO**.

S. Masson et al. (2019, ApJ)

4. Activités du PNST aux interfaces : des autres PN, instituts du CNRS, et plus...

a) Physique des plasmas :

Phénomènes électriques de la haute atmosphère (INSU-OA) ; Confinement et accélération magnétique, chocs et reconnexion dans les plasmas de laboratoire, turbulence (INSIS & INP) ; Plasmas astrophysiques (INSU-AA) notamment les pulsars et les rayons cosmiques (PNHE) ; Initiatives régionales en physique des plasmas (Plas@Par en IdF).

b) Exploration du système solaire & de ses confins :

Magnétosphères, exosphères et environnements ionisés des autres planètes du système solaire, de leurs lunes et des comètes (PNP), qui sont aujourd'hui une composante importante du PNST ; Frontières et régions externes de l'héliosphère, et son interaction avec le milieu interstellaire (PCMI).

c) Physique des étoiles et de leur environnement :

Activité stellaire, y-compris des étoiles de type solaire, champ magnétique de surface et éruptions ; Couplages entre vents stellaires et exo-planètes ; Magnétosphères exo-planétaires (PNPS).

d) Météorologie de l'espace :

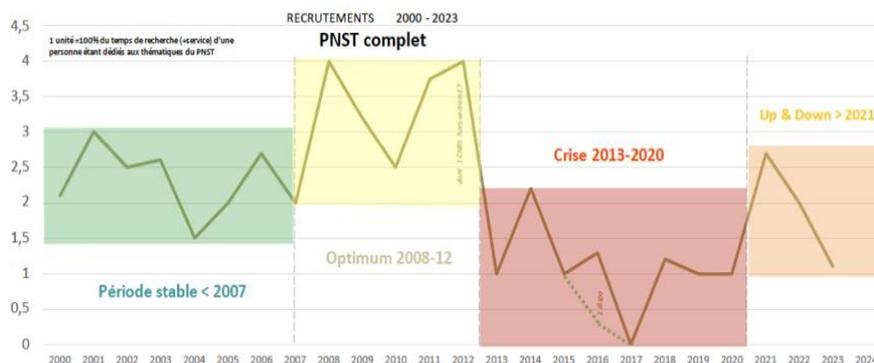
Certains instituts ont de fortes interfaces, y compris en interne, avec les applications en météorologie de l'espace sur la magnétosphère interne et l'ionosphère (ONERA, CEA), ou le géomagnétisme (INSU-OA, TS) ; Organisations nationale (INSU-OFRAME, CNES-GCME, DGA) et européenne (ESA-SSA & EU-E-SWAN) de la météorologie de l'espace.

5. Ressources et besoins en personnels, viviers et difficultés du PNST :

Après une période de recrutement stable précédent 2007, le PNST a vécu une période faste de recrutements pendant 5 ans sur 2008-12. Cette période s'est suivie 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, elle menace même de prolonger la situation de la crise précédente.

La figure ci-jointe illustre ce constat, en indiquant les fractions d'ETP recrutés consacrés au PNST depuis 2000 (i.e. un collègue faisant sa recherche entièrement dans le périmètre du PNST y compte pour 1 qu'il soit chercheur ou enseignant-chercheur, mais n'y compte que pour 0,5 s'il fait, par exemple, 50% de recherche en physique stellaire ou en rayons cosmiques).



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

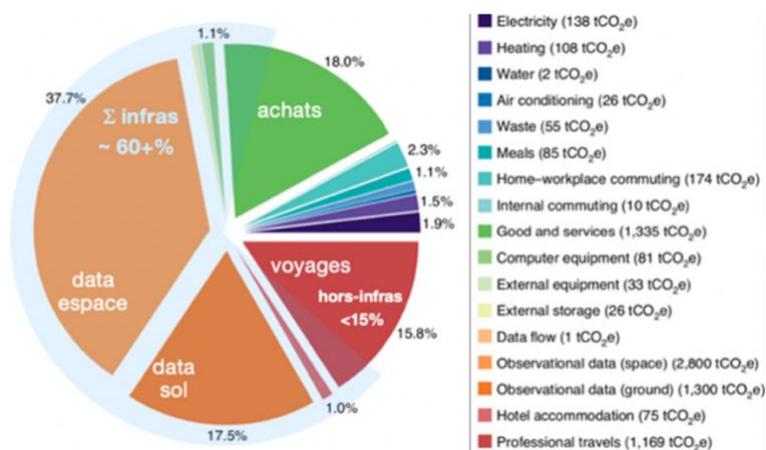
- se font **majoritairement sur la thématique des magnétosphères planétaires** – qui est maintenant devenu une composante majeure du programme, avec un lien synergétique très fort avec le PNP ;
- sont **en forte chute pour la thématique solaire « remote-sensing »** – qui est en train de se réduire dangereusement 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 ;
- sont devenus **quasi-inexistants dans la thématique ionosphérique** – 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 (point i. ci-dessus) et du développement des collaborations aux interfaces (section 4 ci-dessus), 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, elles 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 8 ans crise de faible taux de recrutement pour le PNST.

6. Considérations organisationnelles et environnementales du PNST

Le PNST a engagé une réflexion sur l'impact environnemental de ses activités, et la façon de le réduire. Cette réflexion a débuté lors du colloque de prospective du programme en janvier 2024, lors d'**une table ronde souhaitée par la direction, validée par le CS, et animée par des membres du CS et de la communauté.**

Une partie de la réflexion s'appuie sur les travaux du Labo1.5 et sur le bilan carbone de l'IRAP qui incorpore l'impact des infrastructures de recherche (IR). Cf. la figure ci-contre.



Les réflexions toujours en cours portent, pour le moment, avant tout sur les trajets en avion (qui comptent pour 15,8% en tout). Une prise de conscience et des interrogations sont également ressorties face au constat du poids des achats (18%, supérieur au poids de l'avion, tel que révélé par le Labo1.5) et surtout des IR elles-mêmes (dont l'impact direct est de ~55,2%, tel que révélé par l'IRAP). Or l'impact des IR doit être majoré de la part des achats et des trajets dédiés à leur préparation puis à leur fonctionnement, portant **l'impact total des IR à au moins 60%**. Le PNST estime que des efforts doivent naturellement être faits pour les déplacements en avion, mais n'est pas en capacité d'établir des critères objectifs consensuels.

7. SWOT du PNST :

Forces	Faiblesses
<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 des planètes nombreuse au sein du PNST, sélectionnée sur de très nombreuses missions. • Lien fort avec les agences spatiales et proximité du CNES en particulier. 	<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. • La communauté ionosphérique est très peu nombreuse. • Approches physiques et observationnelles parfois plus proches de la géophysique, amenant quelques incompréhensions avec l'astrophysique sur nos méthodologies.

Opportunités	Menaces
<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 and 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. 	<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 en danger, très peu de recrutements depuis 15 ans ; menaces d'extinction des expertises dans plusieurs domaines. • 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.