

# TÉMOIGNAGE

## Où va l'astrophysique française ? 2. des étoiles et des planètes

Frédéric Pitout, Observatoire Midi-Pyrénées

Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie, Observatoire Midi-Pyrénées, Toulouse.

*Frédéric Pitout fait le point de la recherche dans les programmes nationaux d'astrophysique. Dans ce second article il traite des résultats obtenus, des pistes de recherche et des projets pour les années à venir dans le domaine des étoiles et des planètes.*

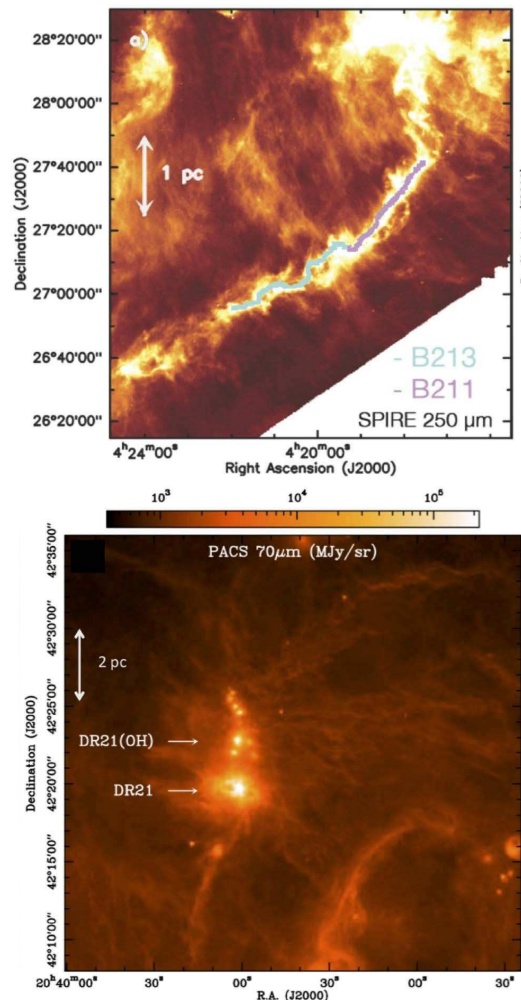
Nous poursuivons notre tour d'horizon de l'astrophysique française avec la physique stellaire, la planétologie et les relations entre le Soleil et les environnements planétaires.

### Programme National de Physique Stellaire (PNPS)

La physique stellaire constitue un des fondements de l'astrophysique moderne. Comment les étoiles naissent, brillent et s'éteignent ont été des questions qui ont, au début du 20<sup>e</sup> siècle, taraudé une brillante génération de chercheurs. Aujourd'hui, la communauté concentre ses efforts sur l'origine des étoiles de toutes masses, sur la formation de disques protoplanétaires, sur le magnétisme des étoiles et la détection des planètes extrasolaires.

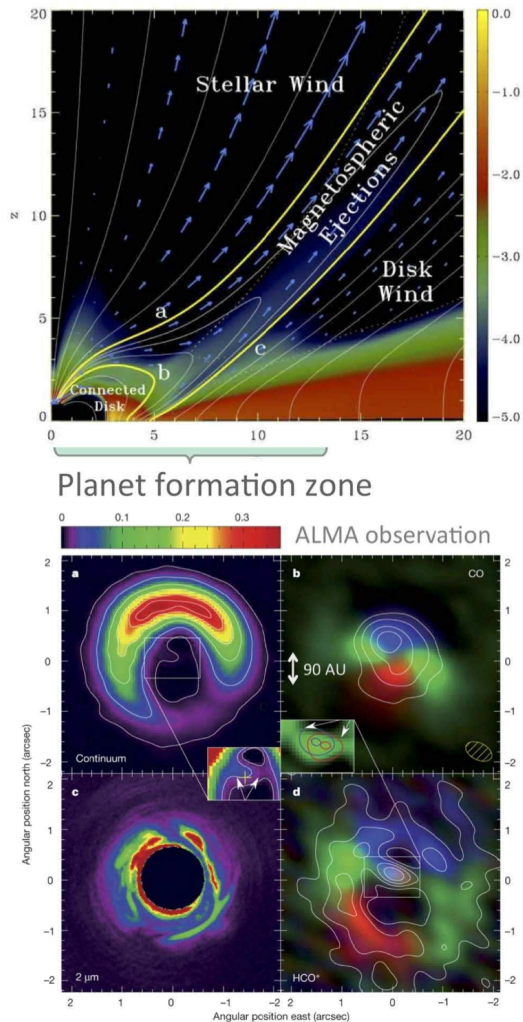
Des techniques d'observation comme l'astérosismologie (étude des modes d'oscillations des étoiles) qui a donné les clefs de la structure interne des étoiles ou l'observation à très haute résolution qui permet de résoudre les étoiles, contribuent aux avancées de cette discipline.

Le milieu interstellaire présente des structures filamentaires denses. Elles sont alimentées par des flots de matière guidés par le champ magnétique et apparaissent perpendiculaires aux filaments (figure 1). On pressentait que ces filaments étaient le siège privilégié de la formation d'étoiles, on a montré que la dynamique des filaments était étroitement liée au taux de formation d'étoiles. De plus, quand plusieurs filaments coalescent, cela peut mener à la formation d'amas d'étoiles ou d'étoiles massives.



**Fig.1.** En haut filament de faible masse dans la région du Taureau ( $d=140$  pc) vu par Herschel. Des striations (de part et d'autre du filament) indiquent des flots guidés par le champ magnétique local ; en bas, filament de forte masse qui forme des étoiles massives et un amas de plusieurs centaines d'étoiles dans Cygnus X ( $d=1400$  pc). Un réseau de filaments alimente la structure centrale massive et très dense.

Les observations récentes de protoétoiles (étoiles en formation) montrent l'accrétion et l'éjection de matière mais aussi la présence de disques protoplanétaires (figure 2). En fait, il semble bien que la formation de planètes commence très tôt dans la formation d'une étoile.



**Fig.2.** À gauche, la structure MHD des parties internes d'un disque d'accrétion d'une proto-étoile au moment où les planètes se forment ; à droite, un disque un peu plus évolué (observé par ALMA) où des planètes sont déjà formées. Les effets sur le disque, comme les sillons et les perturbations sur le disque externe, sont bien observés.

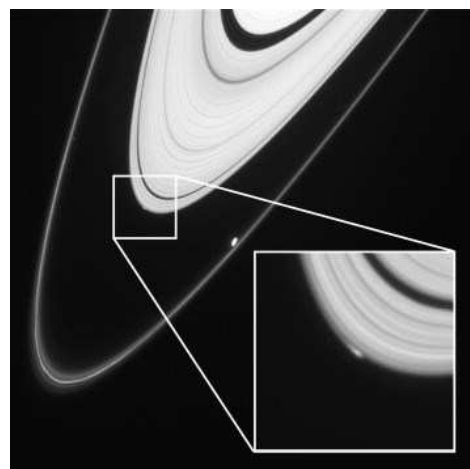
On peut trouver curieux que la recherche d'exoplanètes se pratique au sein du programme national dédié à la physique stellaire. En fait, avant que les techniques d'imagerie directe, encore difficiles à mettre en œuvre se vulgarisent, les exoplanètes sont encore pour la grande majorité détectées indirectement en observant leur étoile par vélocimétrie Doppler, transit photométrique, lentille gravitationnelle ou autre. Les physicien-ne-s stellaires sont donc très impliqué-e-s dans la recherche de planètes extra-solaires. Après les détectations, l'étape suivante est de caractériser les environne-

ments des exo-planètes. C'est ce à quoi sont dédiés les futurs télescopes spatiaux CHEOPS et PLATO (ESA) ainsi que le futur spectro-polarimètre infra-rouge SPIROU qui sera installé au CFHT (en infra-rouge, le rapport de contraste entre une planète et son étoile est plus à l'avantage de la détection de la planète.)

## Programme National de Planétologie (PNP)

La planétologie se trouve à l'interface des sciences de l'Univers et des sciences de la Terre ; d'ailleurs nombre de planétologues ont une formation en géophysique. Les objets du système solaire étant à portée de sonde, il se trouve que la planétologie est une des rares disciplines de l'astrophysique qui bénéficient de mesures *in situ*. On distingue généralement la planétologie « solide » et des environnements planétaires neutres qui sont traités par le PNP, et les environnements planétaires ionisés qui font davantage l'objet du programme national Soleil-Terre (voir ci-après). Les préoccupations du PNP sont l'origine du Système solaire (et des systèmes planétaires plus généralement), la structure et l'évolution des planètes, l'habitabilité et l'exobiologie.

La France s'est fait une spécialité de la modélisation de la formation et de l'évolution du système solaire (modèle de Nice). La prise en compte de la migration vers le Soleil des planètes géantes a permis de comprendre la distribution des masses des planètes telluriques et leur temps de formation, et d'expliquer les différences entre la Terre et Mars. Un modèle de formation des anneaux des planètes géantes a aussi été développé. Ce dernier modèle prédit entre autres la formation d'un satellite au bord externe des anneaux de Saturne, satellite qui a été observé par la sonde Cassini (figure 3).



**Fig.3.** Image de la sonde Cassini montrant dans le zoom la formation d'un satellite.

Dans l'actualité de ces dernières années, il est difficile de ne pas mettre l'accent sur le grand succès du rover Curiosity qui implique de nombreuses équipes françaises.

La récolte de données et de résultats est considérable. Du chlore sous diverses formes a été détecté par l'instrument SAM. L'instrument ChemCam a lui analysé plus de 5 000 échantillons de roche (figure 4), mettant en évidence la présence d'eau de pH neutre et de faible salinité.

L'exploration du système solaire passe par des sondes comme MAVEN qui explore l'environnement de Mars. Mars qui sera encore l'objet d'une attention particulière avec les missions InSIGHT (NASA), ExoMARS (ESA) et Mars 2020 (NASA). C'est vers Mercure que la mission Bepi Colombo (coopération ESA-JAXA) s'envolera pour étudier la planète la plus proche du Soleil et ses interactions avec le vent solaire. Jupiter et ses satellites seront l'objet des missions JUNO (NASA) et JUICE (ESA).

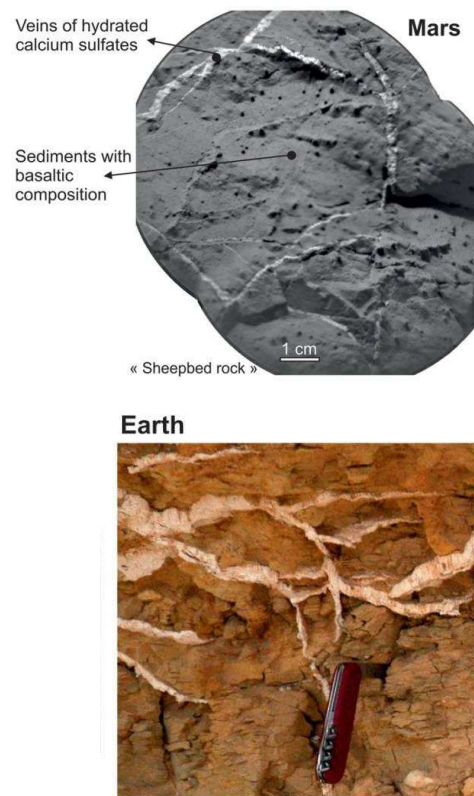


Fig.4. Analyse de la chimie du sol martien par ChemCam en haut montrant différentes compositions de roches et son analogue sur Terre en bas.

## Programme National Soleil-Terre (PNST)

Le PNST traite des relations entre le Soleil et l'environnement ionisé de la Terre (et par extension de l'environnement des planètes du système solaire). Il fédère la communauté des physiciens solaires et des physiciens des plasmas naturels planétaires. Pour ce qui est de l'environnement terrestre, qui constitue un laboratoire naturel de physique des plasmas, et des relations Soleil-Terre, ces recherches s'appuient sur des mesures au sol (magnétomètres, instruments optiques pour l'observation des aurores polaires, radars pour le sondage ionosphérique, etc.) et des mesures *in situ* grâce à des missions satellitaires dédiées (figure 5).

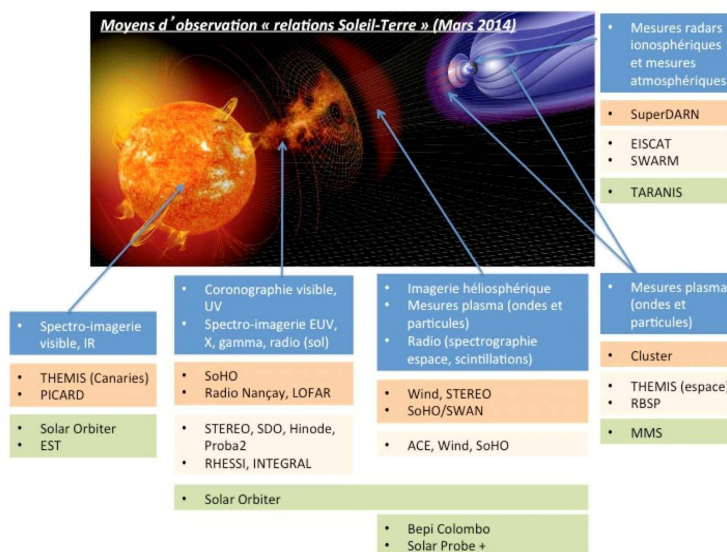
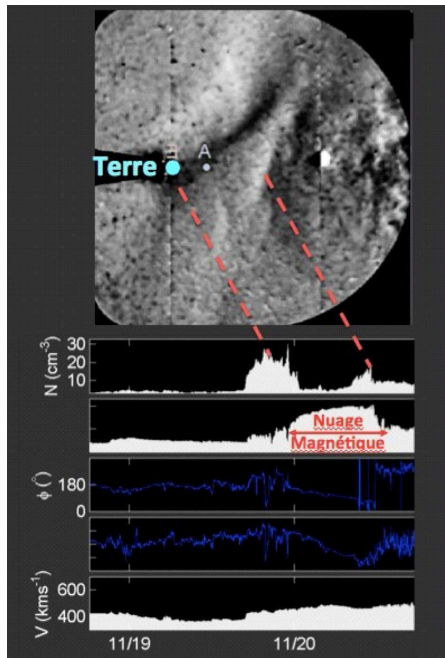


Fig.5. Principaux moyens d'observation utilisés au PNST (en bleu, type d'observation ; en orange foncé et en orange clair, outils disponibles avec responsabilités principale et complémentaire ; en vert, principaux projets futurs).



Les années 2000 ont été marquées par la formidable moisson de résultats des sondes européennes Cluster qui ont étudié la magnétosphère terrestre, sa dynamique interne et ses interactions avec le vent solaire. Elles ont levé le voile sur des phénomènes physiques comme la pénétration du vent solaire dans la magnétosphère par reconnexion magnétique, l'accélération des électrons en zone aurorale et les phénomènes impulsifs dans la queue de la magnétosphère. Cluster a aussi permis de mettre en évidence l'effet de la turbulence par la dissipation d'énergie magnétique des échelles MHD ( $10^5$  km) vers les échelles électroniques (1 km).

Du côté des observations de notre étoile, c'est la mission STEREO d'observation solaire qui a mis son empreinte sur les années 2010. Ces deux satellites ont observé le Soleil sous deux angles différents, donnant ainsi une vision stéréoscopique de l'activité solaire. Les chercheurs ont ainsi eu la possibilité de déterminer la direction et la vitesse de propagation des éjections, chose impossible avec un seul satellite. Les propriétés de ces éjections peuvent ensuite, s'il est avéré qu'elles atteignent la Terre, être corrélées avec l'activité géomagnétique (figure 6). Dans le cadre de la météorologie de l'espace, il s'agit à terme de pouvoir prévoir les perturbations de l'environnement terrestre à partir de l'observation du Soleil.



**Fig.6.** En haut une image du vent solaire obtenue par une sonde STEREO, montrant deux fronts de vent solaire de haute densité électronique percutant l'environnement terrestre (le Soleil est sur la droite, en dehors de l'image. Le cercle noir/blanc à droite dans l'image est Vénus ; en bas des mesures in situ du vent solaire obtenues à proximité de la Terre révèlent

que ces deux fronts sont séparés par un "nuage magnétique", région de champ magnétique torsadé.

Ces dernières années ont été marquées par le lancement des missions multi-satellites Swarm pour l'étude du magnétisme et de l'ionosphère terrestre, et Magnetospheric Multi Scale (MMS) dont le but est de percer les mystères du processus de reconnexion magnétique, processus physique qui intervient dans la pénétration des vents stellaires dans les magnétosphères planétaires, dans l'éjection de matière solaire mais aussi plus universellement dans la formation des jets de plasmas dans les disques d'accrétion des protoétoiles ou de noyaux actifs de galaxies. Côté solaire, les sondes Solar Orbiter (ESA) et Solar Probe Plus (NASA) tenteront de s'approcher au plus près de notre étoile.

## Bilan

Malgré une conjoncture économique pas toujours réjouissante et l'épineux problème du recrutement des jeunes chercheurs (si peu de postes pour toujours plus de prétendants) que nous avons volontairement éludés ici, on peut affirmer que l'astrophysique française se porte bien malgré tout. La preuve en est la foison de résultats scientifiques de qualité et l'implication continue des équipes françaises dans les missions et instruments actuels ou futurs.

On aura remarqué des recouvrements thématiques entre tous les programmes nationaux : les résultats concernant le milieu interplanétaire sont utilisés par les planétologues et les physiciens stellaires pour comprendre la formation des planètes et des étoiles ; les avancées dans le domaine des astroparticules sont indispensables à la cosmologie, etc. De fait, des interactions interdisciplinaires que nous n'avons pas pu développer existent et elles font toute la richesse de l'astrophysique.

D'un point de vue plus comptable, les investissements lourds pour développer des instruments toujours plus performants peuvent être utilisés – et « amortis » – par différents programmes et projets, ce qui est souvent un argument le moment venu de sélectionner les projets instrumentaux futurs (précisons que pour ce qui est des télescopes au sol comme des missions spatiales, les coûts des projets instrumentaux sont tels qu'ils passent quasiment tous par des collaborations internationales.) Là encore, on a toutes les raisons de se réjouir : de nombreux et beaux projets sont en cours, ce qui laisse entrevoir des résultats enthousiasmants et, soyons-en certains, des surprises... ■