

GROUPE Thématique Soleil-Héliosphère-Magnétosphère

Document de synthèse pour le séminaire

De Prospective du CNES

Mars 2009

Composition du groupe SHM : *Thierry Appourchaux, Frédéric Auchère, Patrick Canu, Matthieu Berthomier, Pierre-Louis Blelly, Iannis Dandouras, Marion Marchand, Alain Kerdraon, Chantal Lathuillère, Milan Maksimovic (Président), Michel Parrot, Jean-Louis Pinçon, Jean-Yves Prado (secrétaire).*

Invités : *Dominique Fontaine (Directrice du PNST), Philippe Louarn (Membre du SSWG de l'ESA), Eric Quémerais (représentant de l'INSU), Nicole Vilmer (Présidente du PNST).*

Ce document s'appuie principalement sur les propositions que le groupe a reçues suite à l'Appel à Idées pour la prospective que le CNES a diffusé en janvier 2008. Ces propositions, décrites brièvement dans le Tableau 1, ont été analysées et discutées lors de quatre réunions du groupe qui ont eu lieu entre mai 2008 et janvier 2009. En plus de ces réunions, un atelier spécifique sur la prospective en physique solaire a été organisé conjointement avec le PNST en janvier 2009.

Sans contredire les axes et questions scientifiques prioritaires qui ont été définis lors des derniers exercices de prospective, nous proposons ici le découpage des thématiques SHM qui a naturellement émergé aux fils des discussions que nous avons eues autour des propositions soumises. Ce découpage aboutit à quatre axes majeurs, deux concernant les objets étudiés et deux axes transversaux traitant des couplages inter-milieu, des processus physiques et des relations de causalité à grande échelle. Les axes que nous discutons dans ce document sont donc :

- Physique du Soleil et de l'Héliosphère
- Physique des magnétosphères terrestre et planétaires
- Couplages entre milieux et processus physiques
- Météorologie de l'Espace et Relations Soleil/Climat

Dans la première section, et pour chacun de ces quatre grands axes, nous décrivons les thématiques scientifiques associées. Nous présentons également quelques découvertes et résultats récents obtenus par les équipes françaises grâce au soutien du CNES. Pour finir, nous y présentons les divers éléments de prospective qui ont été proposés par la communauté scientifique suite à l'appel à idées. Dans la deuxième section nous présentons, sous forme synthétique, un bilan de la prospective SHM de 2004. Finalement nous donnons les priorités et recommandations programmatiques du groupe SHM dans la dernière section.

Nom de la proposition	Proposant/ coordinateur	Catégorie et description succincte
SMESE	Trottet,/Vial (LESIA/IAS)	Micro Satellite : Etude des phénomènes éruptifs solaires (CME, accélération de particules)
IMEDIA	Berthomier (LPP)	Micro Satellite : Etude des processus d'accélération en zone aurorale terrestre
DYMS/GOLF-NG	Turck-Chièze (CEA)	Micro Satellite , Cosmic Vision : Etude des modes G solaires, Haute résolution spatiale avec vol en formation
CrossScale	Pinçon (LPC2E)	Cosmic Vision : Etudes multi-satellitaires et multi-échelles des processus plasmas
HiRise	Damé (SA)	Cosmic Vision : Haute résolution spatiale en physique solaire avec vol en formation
Laplace	Blanc (CESR, X)	Cosmic Vision : Etude du système Jovien
Solar Probe/ PHOIBOS	Louarn (CESR)	Cosmic Vision, mission d'opportunité : Mesures in-situ dans la couronne et le vent solaire naissant
KuaFu	Krasnoselskikh (LPC2E)	Mission d'opportunité : mission Sino/Canadienne d'observations solaire et magnétosphérique avec volet Météo de l'Espace
CIHR/Proba 3	Lamy (LAM)	Mission d'opportunité : Projet de coronographie avec vol en formation et haute résolution spatiale
Resonance	Rauch (LPC2E)	Mission d'opportunité : projet russe d'étude des mécanismes d'accélération et d'interaction ondes-particules dans la magnétosphère
SEES	Boscher (ONERA/DESP)	Etudes, R&T : Etude d'une constellation de quatre satellites pour la physique des ceintures de radiation terrestre
Sesame	Lilensten (LPG)	Etudes, R&T : Proposition d'instruments dans le cadre d'études liées à la Météo de l'Espace
MagX	Lallement (SA)	Etudes, R&T : Etude par spectro-imagerie de la magnétosphère terrestre en rayons X de basse énergie.
X, γ , IR	Klein (LESIA)	Etudes, R&T : Veille technologique dans le domaine de l'imagerie X-gamma, IR solaire pour le prochain cycle vers 2022-2023
Météo Espace	Klein (LESIA)	Etudes, R&T : coordination à l'échelle nationale des activités de type « Météo de l'Espace »
Radio Soleil	Klein (LESIA)	Etudes, R&T : Surveillance radio dans la gamme 1 à 50 GHz. Soutien à des activités de type météo de l'espace.

Tableau 1 : Les propositions reçues par le groupe SHM suite à l'Appel à Idées du CNES.

Les axes thématiques SHM : Quelques découvertes et résultats récents et éléments de la prospective

Axe 1 : Physique du Soleil et de l'Héliosphère

Les objectifs scientifiques de la mission Solar Orbiter symbolisent les deux grandes stratégies vers lesquelles semble se diriger la communauté afin de résoudre les dernières grandes questions de la Physique du Soleil et de l'Héliosphère interne : d'une part, s'approcher encore plus près du Soleil afin d'y effectuer des mesures in-situ dans la couronne et le vent solaire naissant et, d'autre part, augmenter la résolution spatiale des observations à distance afin d'accéder aux petites échelles auxquelles se produit l'essentiel de la physique par le biais des transfert et dissipation d'énergie.

Les retards pris par le programme scientifique de l'ESA et les reports successifs de Solar Orbiter ont été très dommageables pour la communauté solaire européenne. Ils n'ont effectivement pas permis à cette dernière d'effectuer en profondeur, comme cela a été le cas pour les autres communautés, l'exercice de prospective qui aurait été nécessaire dans le cadre de « Cosmic Vision ». Ceci est particulièrement vrai pour le domaine des observations à distance du Soleil. Cet exercice est encore nécessaire. Il a été initié à l'échelle nationale conjointement avec le PNST au travers d'un atelier qui a été organisé afin de commencer à définir la prospective post SOHO et Solar Orbiter, à l'échéance de « Cosmic Vision 2 » et au delà. Cet atelier a permis d'établir quatre grandes questions structurantes pour la discipline, autour desquelles est bâtie la prospective présentée ici :

- Q1 : *Comment le champ magnétique est-il engendré à l'intérieur du soleil et quelle est l'origine du cycle solaire?*
- Q2 : *Comment le champ magnétique émerge-t-il de l'intérieur et quel est son impact sur l'atmosphère solaire ?*
- Q3 : *Quels sont les mécanismes impliqués dans la formation de la couronne et du Vent Solaire ?*
- Q4 : *Quels sont les processus physiques expliquant l'activité éruptive du soleil ?*

Cet exercice de réflexion n'a pu encore aboutir, faute de temps. Il doit se poursuivre sous l'égide de PNST et inclure également une concertation à l'échelle européenne. Une fois que la réflexion aura produit un concept de mission de type observatoire solaire, le groupe SHM sollicitera le CNES pour un soutien technique de la DCT à une pré-étude de cette mission (voir section sur les recommandations).

A noter que la physique de l'Héliosphère externe et de son interaction avec le milieu interstellaire n'a pas été abordée de manière explicite faute de proposition correspondante.

Elle demeure néanmoins une thématique sur laquelle des équipes françaises sont fortement impliquées (fin de l'exploitation de Voyager, implication sur IBEX) et mérite donc un soutien de base dans le cadre de cet axe scientifique.

Quelques découvertes et résultats récents

L'étude du Soleil ainsi que l'exploration de l'héliosphère interne ont naturellement bénéficié au cours des quatre dernières années de la poursuite de l'analyse des données de SOHO et d'Ulysse, des premières observations de STEREO ainsi que de la poursuite de l'analyse de données de diverses missions d'opportunité comme RHESSI ou WIND. Diverses découvertes et résultats récents ont été obtenus grâce à ces missions. Nous en présentons ci-dessous une sélection non exhaustive.

Reconstruction tridimensionnelle de structures de la couronne solaire.

La mission STEREO a permis pour la première fois de reconstruire non seulement la troisième dimension, mais aussi la dynamique de structures observées dans la couronne solaire (voir Figure 1). L'observation des régions polaires de notre étoile obtenues par ces sondes a permis de commencer à lever le voile sur des formations appelées "plumes polaires", dont la structure reste encore mal connue, mais qui pourraient jouer un rôle important dans l'accélération du vent solaire. Jusqu'à présent, une controverse existait quand à la nature même de ces objets: les plumes sont-elles des tubes de champ magnétiques ou des effets d'alignement sur la ligne de visée? Les résultats obtenus montrent qu'en fait les deux types de structures peuvent coexister.

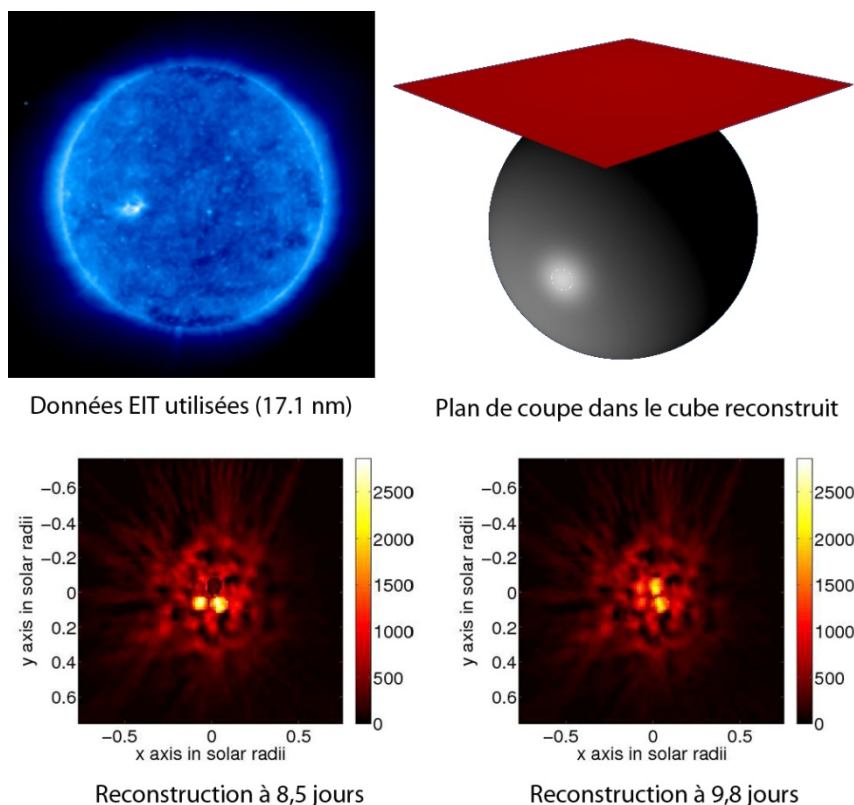


Figure 1 : Reconstructions tri-dimensionnelles obtenues grâce à la mission STEREO

Premières détections de nano-poussières interplanétaires à 1 UA

Grâce à la configuration particulière des antennes électriques des sondes STEREO, les récepteurs radio embarqués à bord ont observé un grand nombre d'impulsions électriques très brèves et assez intenses. Ces impulsions sont dues à l'impact sur le corps des satellites de poussières qui se subliment sous l'effet de l'énergie déposée et s'ionisent sous l'effet du rayonnement UV du Soleil. L'intensité et les flux observés de ces impacts ont permis de déduire que les impacts de STEREO étaient en fait dus à des poussières de la taille de quelques nanomètres, accélérées jusqu'à des vitesses proches de celle du vent solaire par le champ de convection interplanétaire.

Imagerie X/gamma des sites d'accélération des particules énergétiques solaires

La mission RHESSI a permis d'imager pour la première fois les sites d'interaction dans l'atmosphère solaire des ions énergétiques (> quelques MeV/nuc) et des électrons d'énergie >100 keV accélérés au cours des éruptions solaires. Interagissant avec le milieu ambiant, ces particules produisent respectivement un spectre de raies γ et un rayonnement de freinage qui est détectable dans le domaine X et γ pour les électrons les plus énergétiques. RHESSI, qui permet d'imager ce rayonnement pour les éruptions, a montré que les sites d'interaction étaient dans certains cas différents pour les ions et les électrons. Dans le cas des électrons et en fonction de leur énergie (relativistes ou bien ultra relativistes), différentes structures magnétiques pourraient être le siège de l'accélération. Ceci est illustré par les premières comparaisons d'images de rayons X et γ avec RHESSI et de localisation des sources d'émissions à 210 GHz dont l'origine est encore inconnue (rayonnement synchrotron d'électrons ultra-relativistes ou rayonnement synchrotron de positrons résultant des interactions nucléaires des ions énergétiques ?) Cette énigme pourra probablement être tranchée par l'instrument DESIR à bord de la mission SMESE qui permettra d'observer, pour la première fois, la partie infra rouge lointain du spectre des éruptions et d'en comprendre les mécanismes d'émission.

Ejection de Masse Coronale et injection de particules énergétiques dans le milieu interplanétaire

Les contreparties radio des éjections de masse coronale (CME), identifiées en 2001, correspondent à des boucles coronales localisées en aval du front d'onde des CMEs. L'émission radio de ces boucles est due au rayonnement synchrotron d'électrons relativistes ayant une énergie qui peut atteindre quelques MeV. Lors du CME du 15 avril 2001, observé par SOHO et le radiohéliographe de Nançay (NRH), les électrons de très grande énergie détectés dans ce CME ont été, pour la première fois, associés aux électrons relativistes et ions détectés in-situ par la sonde ACE, au niveau de l'orbite terrestre. La fonction d'injection des particules dans la couronne est similaire à celle déduite de l'observation des particules in-situ. Quelque soit le processus d'accélération, les particules détectées à 1 UA ne sont pas donc accélérées dans le milieu interplanétaire, mais à basse altitude dans la couronne.

Les éléments de la prospective

Les propositions soumises par la communauté et qui relèvent de l'axe scientifique 1 sont :

Micro- Satellite CNES : SMESE, DYSM/GoIF-NG

Programme ESA : *Solar Orbiter* (maintenant en compétition CV1), *PHOIBOS* & *HiRise* (toutes deux en *Cosmic Vision*)

Participations à des missions d'opportunité : *Solar Probe Plus*, *CIHR/Proba3*, *KuaFu*

Le projet de micro-satellite SMESE

Les objectifs scientifiques de SMESE concernent principalement la question structurante Q4 et abordent certains aspects de Q2. Ce projet de micro-satellite sur plateforme Myriade comporte trois expériences: DESIR (imageur infra rouge lointain), LYOT (imageur disque et coronographe Lyman alpha) et HEBS (spectrographe X/gamma). Cette mission qui permettra à la communauté d'observer le Soleil dans un domaine spectral complètement nouveau et avec des moyens d'imagerie innovants permettra donc d'étudier :

- *L'origine et le démarrage des éjections de masse coronale (CME) ainsi que leurs relations avec les éruptions grâce aux premières images coordonnées disque/couronne en Lyman α et aux premières mesures du champ magnétique coronal.*
- *Les processus d'accélération des particules de haute énergie grâce aux premières mesures dans l'Infra-Rouge lointain et des premiers spectres dans le domaine X-dur/gamma jusqu'à de très hautes énergies jamais atteintes sur des instruments solaires.*

SMESE est le résultat des études de Phase 0/A qui avaient été soutenues par le groupe SHM en 2004. Ces études ont été effectuées et le groupe de revue de Phase A a conclu en mai 2008 que la mission est prête pour un passage en phase B, les risques technologiques paraissant très faibles.

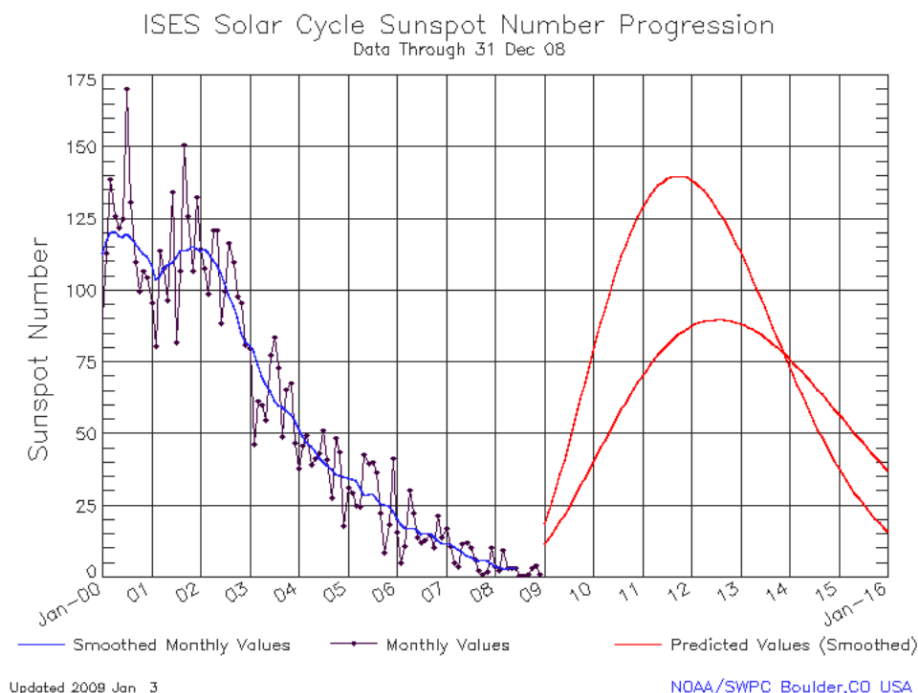


Figure 2 : Evolution du nombre de taches solaire et prédictions du cycle solaire 24 (crédit NOAA)

Concernant le lancement, la date souhaitée (2013/2014) vise à couvrir 3 ans de la phase descendante du cycle solaire 24 qui au moment de l'écriture de ce rapport n'a toujours pas donné de signe évident de démarrage (voir Figure 2). Le nombre d'éruptions solaires étant ensuite une fonction décroissante avec le cycle, un lancement entre 2014 et 2017 induit une diminution progressive de la valeur du retour scientifique, sans toutefois la faire tomber à moins de 50%. Le risque lié au lancement reste donc faible d'autant plus qu'une étude interne de la DCT du CNES montre que même en se limitant à une hypothèse de lancement partagé avec un programme canadien d'observation radar, il existe dans le créneau 2013 - 2015 au minimum une opportunité par an pour un lancement de SMESE sur l'orbite plein Soleil visée.

En résumé, SMESE comporte un ensemble d'instruments cohérent dont on peut espérer des avancées notables dans la compréhension des éruptions et des CMEs. Il faut aussi noter que SMESE/LYOT sera le seul coronographe disponible à l'horizon 2013, et que cette mission apportera un soutien international primordial à l'observatoire SDO de la NASA.

Solar Orbiter

La mission Solar Orbiter initialement proposée dans le cadre du programme obligatoire de l'ESA est maintenant en compétition dans le cadre « Cosmic Vision 1 ». Comme indiqué auparavant, cette mission permet de faire des progrès notables dans les deux voies stratégiques que sont, d'une part, les mesures in-situ dans le vent solaire encore plus près du Soleil qu'auparavant (0.22 UA) et, d'autre part, des observations à distance avec une meilleure résolution spatiale. Solar Orbiter couvre l'ensemble des questions structurantes définies précédemment et plus particulièrement Q2 à Q4. A titre d'exemple :

- *Les distances héliocentriques couvertes permettront d'aborder le problème du chauffage du vent solaire dont l'écoulement est à mi-chemin entre une expansion adiabatique et une expansion isotherme.*
- *En ce qui concerne les éruptions et les injections de particules énergétiques associées, les périodes de co-rotation quasi-synchrone avec le Soleil fourniront l'occasion, grâce au couplage instrumental entre in-situ et télédétection, de séparer les phénomènes spatiaux des phénomènes temporels.*
- *Les observations à haute latitude permettront des observations d'héliosismologie locale.*

Solar Orbiter est la mission structurante d'un grand nombre de laboratoires de physique solaire et héliosphérique en Europe. Elle fédère l'ensemble des communautés SOHO et Ulysse, dont elle regroupe les attentes. Ce faisant, le retour scientifique escompté de Solar Orbiter est d'un très fort potentiel.

A noter pour finir qu'il existe une très forte complémentarité des objectifs scientifiques des missions Solar Probe + (SP+), décrite au paragraphe suivant, et Solar Orbiter (SO). Ces deux missions auront des couvertures héliocentriques complémentaires (9 RS à 0.5 UA pour SP+ et 0.22 à 0.7 UA pour SO) ainsi que des instrumentations complémentaires (mesures in-situ et télédétection pour SO et mesures essentiellement in-situ pour SP+). Cette synergie

d'exploration et de mesures scientifiques est susceptible d'ouvrir des domaines d'investigations nouveaux, associés à la possibilité d'une caractérisation précise de l'évolution spatio/temporelle des processus physiques de l'héliosphère interne et à la quantification de leurs conséquences énergétiques.

PHOIBOS et SOLAR PROBE +

Ces projets ont pour but principal de résoudre une des grandes énigmes de la physique solaire, celle qui concerne l'existence même d'une couronne chaude autour du Soleil et d'un vent qui s'en échappe. Cet objectif concerne donc essentiellement la question structurante Q3 définie auparavant.

Découvrir la proche couronne et explorer l'ultime frontière qu'elle constitue, y réaliser les mesures in-situ qui permettront d'identifier et de quantifier les processus de perte de masse du Soleil et de formation des vents, tels sont les objectifs fondamentaux – exploratoires et scientifiques – d'une SONDE SOLAIRE. La stratégie est simple : des survols aussi proches que permis du Soleil, en deçà de 8-10 Rs, afin de pénétrer les zones où les flux de particules tout juste émis du Soleil, fortement hors équilibre et non relaxés, sont encore chauffés et accélérés pour former les vents qui vont construire l'héliosphère et gouverner une bonne partie de la dynamique des environnements externes d'un grand nombre des objets du système solaire.

Afin de répondre à cette stratégie, depuis des années identifiée parmi les plus innovantes et les plus excitantes de la communauté 'SHM', la mission PHOIBOS a été proposée à l'ESA dans le cadre de CV1. Bien que n'ayant pas été sélectionnée, la mission a été recommandée par le SSWG pour des études R&T pour lesquelles des appels d'offre européens ont été publiés. Un de ces AO concerne des études de matériaux pour le bouclier thermique, études pour lesquelles les compétences du PROMES à Odeillo et de EADS sont reconnues internationalement.

En parallèle de PHOIBOS, la NASA a pris récemment une nouvelle initiative dans le domaine avec la mission Solar Probe Plus, concept moins « contraint » de la mission PHOIBOS ou des projets passés. La contrainte étant budgétaire, la principale simplification concerne un survol plus lointain du soleil (9-10 Rs). Cela simplifierait le lancement de la sonde et son design thermique. Un appel d'offre instrumental est prévu avant mi 2009.

A noter, comme décrit auparavant, qu'il existe une très forte complémentarité des objectifs scientifiques des missions Solar Probe + et Solar Orbiter.

KuaFu

La mission soleil-terre KuaFu est menée par la Chine qui fournirait 3 plateformes et leur lancement, en collaboration avec le Canada et plusieurs pays européens pour l'instrumentation. Cette dernière pourrait être réalisée en association avec des équipes chinoises. KuaFu est actuellement en cours d'examen au CNSA (Chinese National Space Agency) pour passer en phase de "technical breakthrough" (équivalent de phase A). La mission comporte deux volets : météo de l'espace avec CMA (Chinese Meteorological

Agency) et volet scientifique basé sur de nouvelles approches de la physique soleil terre et du vent solaire. Elle se compose initialement de trois sondes: KuaFu-A, KuaFu-B1 et KuaFu-B2:

KuaFu-A sera situé au point de Lagrange L1, et disposera d'instruments destinés à l'observation du disque et de la couronne dans les domaines EUV et visible, de mesures X et gamma, et d'instruments destinés aux mesures in situ : ondes et particules énergétiques, plasma et champ magnétique local. Lors du Symposium KuaFu de septembre 2008, il a été proposé de séparer KuaFu A en deux sondes : KuaFu-A1 pour les mesures in situ à L1 et KuaFu-A2, qui pourrait être en orbite terrestre, pour les imageurs. Les objectifs scientifiques de KuaFu-A1 seraient alors centrés sur la microphysique du vent solaire (turbulence, dissipation), et les lancements pourraient être échelonnés en fonction du contexte programmatique international.

KuaFu-B1 et KuaFu-B2 évolueront sur des orbites polaires opposées de façon à permettre l'observation continue de l'activité aurorale et de la magnétosphère interne et de sa dynamique (imagerie aurorale UV et magnétosphérique par détection d'atomes énergétiques neutres), et mesures in situ (plasma, particules de haute énergie, ondes, champ magnétique local...).

A noter, pour finir, que le projet KuaFu relève également des axes thématiques 2 et 4, décrits plus loin dans le document.

CIHR / Proba 3

CIHR est une proposition faite dans le cadre de la mission Proba 3 de l'ESA dont le but est d'étudier la faisabilité technologique du vol en formation. Cette mission reprend le concept ASPICS de coronographie de la très basse couronne (~1.01 Rs) qui avait été proposé par la communauté SHM lors du dernier séminaire de 2004. Ce concept fait appel au vol en formation de deux satellites dont l'un sert d'occulteur à l'autre. Les objectifs scientifiques liés à cette proposition sont liés aux questions structurantes Q2 à Q4 définies précédemment. Plus particulièrement l'étude de la très basse couronne pourrait permettre d'aborder les mécanismes de dissipation de l'énergie au travers de la région de transition chromosphère / basse couronne et d'aborder l'aspect du chauffage coronal sous un aspect nouveau.

DYSM/GOLF-NG et HiRise

La proposition DYSM/GOLF-NG a pour objectif principal la mesure des modes de gravité solaires (modes G) dont l'étude est fondamentale pour la compréhension de la structure interne du Soleil en deçà de 0.5 Rs, de sa dynamique, de son fonctionnement et de ses cycles. La mesure des modes G permettrait donc la compréhension de la machinerie interne du Soleil et des différents processus expliquant son magnétisme, facteur déterminant de son activité.

Dans l'état actuel de développement de l'instrument Golf-NG, et malgré la recommandation positive de 2004, il n'est pas encore possible de statuer sur la possibilité d'atteindre la sensibilité en bruit nécessaire à la mesure des modes G. L'amplitude de ces derniers pourrait également être marginalement supérieure au bruit solaire intrinsèque de la granulation. Reconnaisant néanmoins l'apport fondamental de cette thématique pour la physique solaire, le groupe SHM encourage la mise en place d'un groupe de travail CEA/CNES sur ce sujet et plus particulièrement la caractérisation du bruit intrinsèque de l'instrument GOLF-NG (voir recommandation à la fin du document).

La proposition HiRise, soumise à « Cosmic Vision », s'appuie sur des objectifs scientifiques et des concepts de mission similaires à ceux de CIHR et de la partie DYNAMICS de DYSM/GOLF-NG (également soumise à « Cosmic Vision »). Cette proposition, qui vise à la haute résolution spatiale en physique solaire, est une mission de vol en formation qui repose essentiellement sur l'instrument SOLARNET dont la faisabilité n'a pas été démontrée.

Comme indiquée auparavant, la réflexion générale sur la prospective en physique solaire, permettant de faire émerger un concept de mission ambitieux du type SOHO, doit encore aboutir. Une coordination entre les propositions s'appuyant sur le vol en formation et la haute résolution spatiale est encore nécessaire afin de faire émerger les véritables stratégies scientifiques qui pourraient permettre de répondre aux questions structurantes de la discipline. Ce travail doit être mené dans le cadre de l'action de prospective solaire menée sous l'égide du PNST.

Axe 2 : Physique des magnétosphères terrestre et planétaires

La physique de la magnétosphère terrestre a très largement bénéficié de l'apport fondamental de la mission CLUSTER, premier véritable exemple d'une mission multi-satellites qui a inspiré par la suite les missions MMS et THEMIS de la NASA. Cette mission, dont l'exploitation se poursuit, a permis d'asseoir un grand nombre de connaissances sur la structure globale de la magnétosphère terrestre en tant que prototype astrophysique de l'interaction entre un plasma supersonique et faiblement collisionnel et un objet fortement magnétisé, possédant lui-même une source interne de plasma. La structuration spatiale des différentes régions de cette magnétosphère et leurs dynamiques sont globalement comprises, bien que des questions fondamentales sur leurs inter-connexions demeurent (comme par exemple la physique de l'interaction ionosphère magnétosphère en zone aurorale). L'apport des simulations globales et leur confrontation aux observations fait également des progrès.

A partir de CLUSTER, la communauté concernée semble s'orienter vers deux directions parfaitement complémentaires. Tout d'abord, on note le passage depuis l'étude de l'objet prototype que constitue la magnétosphère terrestre vers celui des mécanismes physiques qui l'animent (turbulence, accélération, chocs, reconnexion, ...). La magnétosphère terrestre n'est plus uniquement considérée comme un objet à étudier en soi mais comme un véritable laboratoire de physique des Plasmas, siège de processus fondamentaux universels dont l'étude est susceptible de faire progresser d'autres domaines astrophysiques que ceux exclusifs des disciplines « SHM ». Cette direction, qui constitue en grande partie l'axe

thématique discuté dans la section suivante (couplages entre milieux et processus physiques), a conduit au projet Cross-Scale, actuellement en compétition pour Cosmic Vision.

L'autre direction que prend clairement maintenant la communauté est celle des études comparées des diverses magnétosphères et environnements ionisés de notre système planétaire. Un premier thème d'étude concerne les planètes géantes (Jupiter et Saturne). Il s'agit dans les deux cas de systèmes en rotation rapide qui offrent d'excellents contextes pour l'analyse de la structure et de la dynamique de 'magnétodisques', des interactions 'binaires' satellites/objet central et de situations à multiples sources internes de plasma, éventuellement variables dans le temps. Les mesures faites dans ces environnements permettent d'aborder des thématiques générales liées à la dissipation d'énergie de rotation et les transferts de moment cinétique dans des plasmas de nature complexe (multi-espèces, avec mélange de neutres). Un deuxième thème concerne l'analyse comparative des interactions vent solaire/objets faiblement ou non magnétisés. Un accent particulier est mis sur la mesure de l'érosion atmosphérique pour tenter de quantifier les effets à 'long terme' des interactions sur les évolutions atmosphériques, de Mars en particulier. Une mission dédiée à l'analyse de ces processus vient d'être sélectionnée par la NASA : MAVEN. Sur des thématiques proches, on notera que la mission Rosetta se rapproche et permettra des avancées dans le domaine des interactions vent solaire/petits corps et, sans doute, du « space weathering » des surfaces.

Quelques découvertes et résultats récents

Comme mentionné auparavant, l'apport de CLUSTER a été fondamental pour la discipline. En plus des résultats, forcément restrictifs, présentés ci-dessous, la mission CLUSTER a permis par exemple de faire d'importantes avancées sur la reconnexion magnétique (rôle de la turbulence, mise en évidence des régions de diffusion électronique et ionique ...) ou bien la physique des interfaces magnétosphériques (premières observations d'ondes de surface sur le choc en amont de la Terre, mise en évidence de solitons à la magnétopause, rôle de l'instabilité de Kelvin Helmutz ...)

L'autre grande mission concernant cet axe thématique est CASSINI, qui a permis d'approfondir notre connaissance de Saturne et de son couplage avec ses lunes.

Premières observations de reconnexion dans des vortex géants.

Les observations des satellites Cluster ont permis de mettre en évidence les mécanismes de reconnexion magnétique dans des tourbillons géants de plasma (environ 40 000 km) localisées sur les flancs de la magnétopause terrestre. Ces tourbillons sont le résultat d'instabilités de Kelvin-Helmutz. Ils facilitent la pénétration du vent solaire dans la magnétosphère. Ces observations montrent que les instabilités de Kelvin Helmutz et la reconnexion magnétique, identifiées jusqu'à présent comme deux mécanismes distincts, peuvent coexister sous certaines conditions.

Reformation de la structure des chocs sans collision.

Les données des quatre satellites de Cluster ont fait significativement avancer notre compréhension de la physique des chocs sans collision. Parmi les avancées importantes figure la première mise en évidence expérimentale directe de la reformation de la structure du choc en amont de la Terre. Le déroulement de la reformation observé expérimentalement est en très bon accord avec les prédictions théoriques et les résultats fournis précédemment par des simulations numériques.

Première détection d'un système d'anneaux autour d'un satellite planétaire.

L'expérience MIMI sur la sonde CASSINI a permis de mettre en évidence la présence d'un système d'anneaux autour de Rhéa, qui est le deuxième plus grand satellite de Saturne (après Titan), et est composé d'environ 75% de glace d'eau. Les anneaux de Rhéa sont composés de particules solides, d'une taille allant jusqu'à environ 1 mètre, qui sont en orbite équatoriale autour du satellite formant ainsi un disque (voir Figure 3). Leur détection a été possible grâce aux signatures d'absorption qu'ils induisent sur les populations d'électrons énergétiques, dans la magnétosphère de Saturne et mesurées par MIMI dans l'environnement proche de Rhéa. Ce résultat constitue la première détection d'un système d'anneaux autour, non pas d'une planète, mais d'un satellite planétaire.



Figure 3 : Vue d'artiste des anneaux autour du satellite de Saturne Rhéa. Les particules solides composantes de ces anneaux ne sont pas à l'échelle. Saturne apparaît au fond de l'image. © NASA.

L'énigme de la période radio variable de Saturne.

La mesure de la rotation interne des planètes géantes fait appel à leurs émissions radio magnétosphériques (aurorales). Pour Jupiter, la précision atteinte est de 10^{-6} , mais pour Saturne, la période radio mesurée par le récepteur radio de RPWS révèle des fluctuations de $\pm 1\%$ (± 6 min. sur une période de ~ 10 h40m). Bien que cette variabilité de la période radio de Saturne demeure une énigme, largement débattue par la communauté, il a été démontré récemment que les variations de vitesse du vent solaire s'écoulant autour de Saturne pouvaient être en partie à l'origine de ces fluctuations. Les capacités d'imagerie de RPWS

sont actuellement utilisées pour tenter de mesurer la rotation interne corrigée de l'effet du vent solaire.

Mesures des taux d'échappements atmosphériques

Avec les mesures de MarsExpress et VenusExpress, il a été possible de préciser la configuration générale de l'obstacle magnétique induit par l'interaction du vent solaire avec l'ionosphère de Mars et de Vénus. Les premières mesures du taux d'échappement de certains ions ont été réalisées, prouvant la réalité du phénomène d'érosion atmosphérique.

Les éléments de la prospective

Les propositions soumises par la communauté et qui relèvent de l'axe scientifique 2 sont :

Micro- Satellite CNES : IMEDIA

Programme ESA : TANDEM/Laplace (toutes deux en Cosmic Vision)

Participations à des missions d'opportunité : Resonance, Kuafu B

Propositions d'études et R&T : Mag X

Avant toute chose, le groupe SHM rappelle que les objectifs scientifiques de la mission **Bepi-Colombo**, qui va permettre les premières études complètes et approfondies de la magnétosphère de Mercure, ont largement été discutés et approuvés lors de précédentes prospectives à l'échelle européenne. Bepi Colombo est toujours une mission prioritaire de la discipline. Le groupe soutient donc naturellement la poursuite de sa mise en œuvre, dès que la faisabilité technique en est démontrée par l'ESA.

IMEDIA

L'Investigation Multi-Echelles De l'Interface Aurorale – le projet IMEDIA – a pour objectif de comprendre le fonctionnement de la zone de transition étroite entre l'ionosphère proche et dense de la Terre et sa magnétosphère lointaine et diluée. C'est une région clé de notre environnement spatial immédiat car l'énergie du vent solaire se dépose dans notre atmosphère via cette interface. Sa grande dynamique spatio-temporelle impose de l'étudier avec au moins deux satellites identiques. La filière Myriade du CNES offre cette opportunité, maintenant que les activités de R&T ont permis de concevoir des instruments qui n'imposent plus d'être embarqués sur une plate-forme spinnée.

IMEDIA est un projet qui permet d'aborder le problème non encore résolu de la dynamique aurorale terrestre (déjà abordé dans le passé par le concept IBIZA) où l'accélération de particules chargées par des champs électriques probablement très localisés et les processus non-thermiques d'émission de rayonnements électromagnétiques associés ne sont pas encore compris.

Au-delà de l'étude stricte de la magnétosphère terrestre, IMEDIA aborde également les thématiques de l'Axe 3 et ouvre des perspectives astrophysiques d'actualité immédiate. En effet c'est dans les régions aurorales étudiées par IMEDIA (1000 à 10000 km d'altitude) que

prend naissance l'érosion ionosphérique qui, sur des temps géologiques, peut jouer un rôle majeur dans la biocompatibilité d'une planète similaire à la Terre.

Le concept IMEDIA a été étudié par la DCT du CNES à Toulouse. Cette pré-étude montre que la mission est très probablement faisable dans une configuration à deux plateformes Myriade lancées par Soyouz. Le cadre de partenariat scientifique international est également envisageable.

LAPLACE/EJSM

La mission EJSM (Europe & Jupiter System Mission propose un retour dans le système de Jupiter pour une exploration approfondie de ce système, en tant que « système planétaire en miniature », visant à comprendre et retracer sa trajectoire évolutive depuis sa formation jusqu'à l'éventuelle émergence de la vie sous la couche glacée de l'une de ses lunes, Europe. Elle est composée de deux éléments séparés : un orbiteur d'Europe et de Jupiter (JEO - NASA), et un orbiteur de Ganymède et de Jupiter (JGO - ESA). EJSM explorera durant deux ans le système de Jupiter avant que ses deux composantes ne se mettent en orbite autour des lunes. EJSM pourrait être complétée en 2009 par un orbiteur magnétosphérique jovien (JMO - JAXA), tandis que RosCosmos étudie un atterrisseur d'Europe qui constituerait le pas logique suivant dans l'exploration d'Europe.

Bien que son implication ne soit pas encore complètement définie, la communauté SHM reste fortement intéressée par cette mission qui permettra de poursuivre les études du système magnétosphérique Jovien. Il convient donc de suivre l'évolution de ce projet et d'apporter le support en R&T nécessaire aux équipes qui sont impliquées dans ces études.

TANDEM/TSSM

La mission TSSM (Titan & Saturn System Mission) étudiera Titan grâce à un orbiteur et des analyses in situ, mais aussi explorera Encelade et la magnétosphère de Saturne. TSSM explorera Titan en tant que système, en couplant les études sur la haute atmosphère, les interactions avec la magnétosphère, l'atmosphère neutre, la surface, l'intérieur, ainsi que son potentiel astrobiologique. La conception de TSSM repose sur l'héritage Cassini-Huygens, mais va bien au-delà de cette mission pionnière dans l'étude de Titan et d'Encelade. TSSM permettra d'obtenir une couverture globale et à haute résolution de la surface de Titan, ainsi qu'une importante couverture in situ, et de nombreux survols de la lune Encelade.

Tout comme pour EJSM, Il convient d'apporter le support en R&T nécessaire aux équipes qui sont impliquées dans ces études.

A noter toutefois par soucis de clarification que, bien que n'ayant pas formellement reçu de proposition concernant TSSM, le groupe a néanmoins inclus cette mission dans le présent document suite à l'intérêt de la communauté concernée exprimé lors de nos réunions. A noter également qu'au moment du séminaire de prospective, une des propositions EJSM ou TSSM sera en principe éliminée du processus de compétition pour les missions « Large » de « Cosmic Vision ».

RESONANCE

Le projet RESONANCE-M4S est un projet russe dédié à l'étude des interactions ondes/particules et à la dynamique du plasma dans la magnétosphère interne. Deux paires de satellites sont proposées pour effectuer des mesures simultanées dans un même tube de force, la première paire couvrira la zone aurorale tandis que la deuxième paire sera positionnée dans la zone équatoriale (L=4-5.5). Les satellites de chaque paire devront être manoeuvrant afin d'être capable d'accéder aux processus transverses et parallèles au champ magnétique terrestre et ainsi, effectuer des mesures à petites et grandes échelles spatiales. Ce projet a donc pour objectif de mettre en évidence les processus microphysiques dont l'effet cumulé se manifestera par un comportement plus global, c'est-à-dire macroscopique. Ceci est particulièrement vrai pour le rayonnement kilométrique et les phénomènes de résonance dans la plasmasphère.

Mag-X

La proposition Mag-X concerne l'étude par spectro-imagerie de la magnétosphère terrestre, en rayons X de basse énergie. La source d'émissions X, qui fait l'objet de cette proposition, est la désexcitation des ions hautement ionisés contenus dans le vent solaire, suite à des réactions d'échange de charge lors de leur interaction avec le gaz neutre et froid qui constitue la plus haute couche de l'atmosphère, l'exosphère (ou géocouronne). Cette couche s'étend à des distances de plusieurs rayons terrestres. L'étude par spectro-imagerie des rayons X ainsi émis devrait permettre de caractériser la morphologie et la dynamique de ces zones d'interaction ou de pénétration du vent solaire dans la magnétosphère, et éventuellement de dimensionner cette entrée du plasma solaire dans l'environnement terrestre et d'évaluer son bilan de masse.

La genèse de cette proposition est originale puisque les phénomènes concernés ont été observés en premier dans le milieu interplanétaire. Néanmoins une modélisation plus fine des phénomènes physiques de base ainsi qu'une étude instrumentale sont nécessaires afin de correctement définir une R&T que le groupe SHM soutient.

Axe 3 : Couplages entre milieux et processus physiques

Comme nous l'avons déjà mentionné précédemment, la communauté SHM est passée peu à peu avec CLUSTER de l'étude de l'objet prototype que constitue la magnétosphère terrestre vers celui des mécanismes physiques et processus fondamentaux qui l'animent et qui sont susceptibles de faire progresser d'autres domaines astrophysiques que ceux exclusifs de nos disciplines. Cette tendance, en fait, se généralise à une grande partie des domaines SHM.

En effet, la plupart des plasmas du système solaire accessibles aux missions SHM sont des milieux peu collisionnels, dans lesquels les libres parcours moyens de particules sont grands devant les échelles caractéristiques du milieu. Dans de telles conditions, l'équilibre

thermodynamique de ces systèmes est rarement atteint et les notions classiques relevant par exemple de la diffusivité, compressibilité, viscosité, adiabaticité n'ont pas de raison d'être à priori. Quelles sont alors les équations « constitutives » raisonnablement générales et adéquates permettant de relier la physique des petites échelles à celles des évolutions macroscopiques des systèmes concernés ? Un grand nombre de missions spatiales SHM permettent en fait également d'aborder cette question de physique fondamentale.

La plus grande partie de l'Univers visible se trouve sous la forme de plasmas hautement ionisés. On sait maintenant que la dynamique et le comportement de ces plasmas sont dominés par trois processus physiques majeurs : les chocs, la reconnexion magnétique et la turbulence plasma. Ces phénomènes, comme nous venons de l'énoncer plus haut, sont encore mal compris du fait de l'absence d'informations détaillées sur les interactions entre les différentes échelles physiques. Les plasmas accessibles à la mesure dans le domaine SHM constituent donc des laboratoires uniques pour l'accès à ces informations, lesquelles ne sont pas accessibles via des mesures à distances et sont (et resteront longtemps) impossibles à obtenir via des simulations numériques.

L'autre partie de l'Axe thématique 3 concerne les couplages entre les divers milieux étudiés et la physique des interfaces mises en jeu. En effet il n'est pas possible de comprendre la dynamique des différents milieux ou structures étudiés en les isolant de leur contexte général et en négligeant les interactions qui agissent à leurs interfaces. L'ionosphère terrestre constitue un bon exemple. On sait en effet qu'il existe des transferts d'énergie entre la haute atmosphère de la Terre et l'environnement ionisé constitué par la magnétosphère interne. Comprendre ces transferts d'énergie ne sera possible qu'en comprenant la physique des interfaces entre, d'une part, la haute atmosphère et l'ionosphère, et entre cette dernière et la magnétosphère d'autre part. Cet exemple illustre bien une partie des objectifs scientifiques de la mission TARANIS décrite ci-dessous.

Les autres exemples illustrant cette problématique de couplages entre milieux sont nombreux : les exosphères de Mercure ou de la Lune, les couplages sol/atmosphère/vent solaire dans le cas de Mars, les satellites Jovien etc ... Dans bon nombres de cas l'étude des processus mis en jeu fait également appel à des couplages de différentes disciplines de la physique elle-même : couplages plasmas / rayonnement, plasma / neutres, plasma / solides etc ...

Quelques découvertes et résultats récents

Nous présentons ci-dessous quelques résultats concernant cet axe obtenus par la mission CLUSTER et par la mission DEMETER qui a permis de mettre en évidence, entre autre, l'effet de l'activité humaine sur l'ionosphère.

Découverte de Vortex d'Alfvén dans les plasmas spatiaux

Les mécanismes de la dissipation de l'énergie des grandes vers les plus petites échelles et de manière ultime vers les particules constituantes des plasmas faiblement collisionnels ne sont toujours pas connus. Les mesures effectuées à bord des satellites Cluster dans le cornet polaire et la magnétogaine ont permis de découvrir et d'identifier des structures en forme

de vortex à différentes échelles. Ces structures, qui sont interprétées comme des vortex d'Alvén, pourraient être des constituants élémentaires de la turbulence dans des plasmas magnétisés qui joueraient un rôle important pour les transferts de particules, de quantité de mouvement et d'énergie dans ces régions de la magnétosphère Terrestre. Plus récemment, de tels vortex ont également été observés dans la magnétogaine de Jupiter grâce aux observations de Cassini.

Anisotropie de la cascade en énergie pour la turbulence UBF-EBF

Le passage d'une analyse de forme d'onde temporelle en spectre des fluctuations électromagnétiques exprimées en fonction de leurs vecteurs d'ondes K n'est pas une entreprise aisée dans les plasmas spatiaux, notamment en présence d'écoulement. L'analyse multipoint (K -filtering) des données Cluster a permis d'obtenir des informations nouvelles sur la structure de la turbulence UBF-EBF observée dans la magnétogaine terrestre. L'estimation directe du spectre en K de la turbulence a permis de mettre en évidence l'anisotropie de la cascade en énergie. Celle-ci est essentiellement monodimensionnelle et opère suivant la direction de l'écoulement du plasma. Les résultats obtenus fournissent des informations cruciales sur la voie à suivre pour une modélisation réaliste de la turbulence dans ces régions de l'espace.

Mise en évidence de l'activité humaine sur la magnétosphère terrestre

Le micro-satellite DEMETER qui a été lancé en Juin 2004 est toujours opérationnel avec un fonctionnement nominal des instruments. Les données recueillies tout autour de la Terre ont permis de mettre en évidence les effets de l'activité humaine sur la magnétosphère : influence des émetteurs TBF utilisés pour les communications sur les particules des ceintures de radiation et influence du rayonnement émis par les harmoniques du 50 ou du 60 Hz. La Figure 4 montre la distribution géographique du flux des électrons de 200 keV quasi piégés. On note une large augmentation du flux au niveau de l'anomalie de l'Atlantique Sud et sa contrepartie dans l'hémisphère Nord où l'on observe une décroissance, ainsi qu'une structure associée à l'émetteur NWC en Australie qui est seulement détectée à partir de la côte ouest et suit la ligne $L=1.7$ (pointillé) comme il est prévu pour la dérive des électrons.

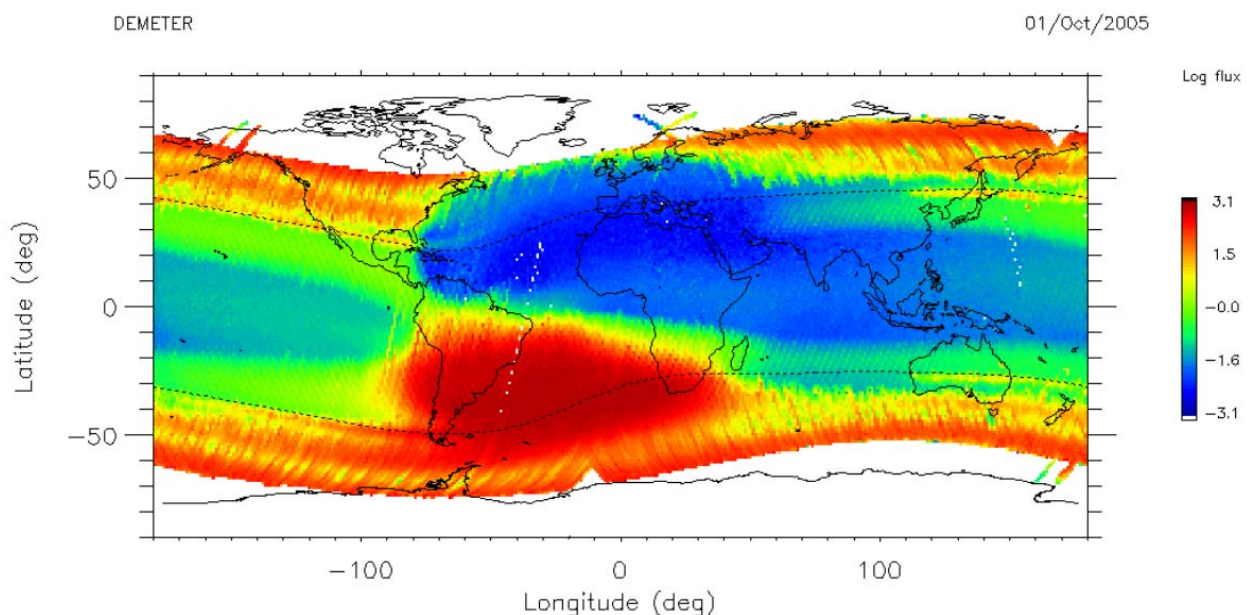


Figure 4 : Distribution géographique du flux des électrons de 200 keV quasi piégés.

Dynamique des cavités de plasma dans les régions équatoriales de l'ionosphère terrestre

DEMETER a également permis d'étudier la dynamique des cavités de plasma de grande échelle qui se développent dans les régions équatoriales de l'ionosphère terrestre lors des orages magnétiques les plus intenses. Les mesures montrent que ces cavités sont capables d'affecter fortement la propagation des ondes électromagnétiques dans l'ionosphère. Il s'y développe une turbulence électromagnétique de grande amplitude induite par les éclairs atmosphériques survolés par DEMETER. Cette turbulence est à l'origine d'un chauffage intense des ions.

Les éléments de la prospective

Les propositions soumises par la communauté et qui relèvent de l'axe scientifique 3 sont :

Micro- Satellite CNES : TARANIS

Programme ESA : CrossScale (*en compétition Cosmic Vision*)

A noter que les projets IMEDIA ainsi que TANDEM et LAPLACE relèvent également de cette thématique.

TARANIS

TARANIS est un projet de microsatellite dédié à l'étude de la physique des TLEs (Transient Luminous Events) et TGFs (Terrestrial Gamma ray Flashes) et, plus généralement, de tous les transferts impulsifs d'énergie entre la haute atmosphère et l'environnement spatial de la Terre. De tels transferts impulsifs d'énergie ont été mis en évidence dans le courant des années 90 à partir d'observations faites au sol et à bord de satellites (Navette spatiale, Station spatiale, FORMOSAT 2 pour les TLEs, CGRO et RHESSI pour les TGFs). Ces phénomènes sont observés au dessus des zones orageuses actives et semblent être initiés par les éclairs d'orage.

Le concept de la mission TARANIS (observation au Nadir) et le choix de l'instrumentation embarquée permettra de répondre aux nombreuses questions restant en suspens concernant les processus physiques à l'origine de ces phénomènes. Les principaux objectifs scientifiques de TARANIS sont :

- *La caractérisation des régions sources des TLEs et TGFs, l'étude des conditions environnementales propices à la génération de ces phénomènes (activité orageuse, modifications du plasma thermique, corrélation avec les gerbes de particules énergétique créées par les rayons cosmiques, etc.)*
- *L'identification des mécanismes de générations des TLEs et TGFs. Notamment l'identification des signatures (particules, champs électromagnétiques) révélatrices des processus de génération ou bien produites lors de la génération*
- *L'évaluation des effets potentiels des TLEs, TGFs, et bouffées d'électrons (accélérés ou précipités) sur la haute atmosphère terrestre et les ceintures de radiations.*

Fortement soutenu lors du dernier exercice de prospective de 2004, le projet TARANIS est maintenant en fin de phase B, prêt pour un passage en phase C/D. La nouvelle organisation de l'équipe scientifique proposant l'instrument XGRE renforce l'implication de la communauté scientifique française, et permet donc de sécuriser complètement le montage du projet pour le déroulement des phases suivantes. Par ailleurs, le choix du détecteur retenu aujourd'hui (scintillateurs à base de LaBr3 développé par Saint Gobain) améliore les performances de l'instrument, renforce les objectifs scientifiques de XGRE et donc de l'ensemble du projet TARANIS.

CrossScale

La mission Cross-Scale consiste à mettre en orbite autour de la Terre une flotte de satellites en formation passant à travers la queue magnétosphérique, le choc terrestre et la magnétogaine afin d'étudier les phénomènes clés des plasmas que sont la reconnexion, les chocs sans collisions et la turbulence.

L'apport fondamental de Cross-Scale, par rapport aux missions multipoints telles que Cluster et MMS, sera la couverture simultanée des principales échelles physiques des plasmas. Cela permettra, pour la première fois, d'étudier la dynamique non-linéaire et multi-échelles des plasmas sans collisions et de mettre en évidence la façon dont les processus physiques à ces différentes échelles interagissent pour produire les phénomènes complexes observés. Idéalement, Cross-Scale devrait être composé de douze satellites en formation répartis suivant trois tétraèdres imbriqués. La distance entre satellites de chacun des trois tétraèdres sera accordée à l'une des trois principales échelles physiques des plasmas spatiaux :

- *L'échelle cinétique des électrons (de l'ordre de dix km),*
- *L'échelle cinétique des ions (de l'ordre de quelques centaines de km),*
- *L'échelle fluide (quelques milliers de km).*

Cross-Scale a été retenue par l'ESA comme candidat à un lancement de classe M dans le cadre du programme Cosmic Vision de l'ESA. Parallèlement à Cross-Scale, le concept de mission SCOPE vient d'être sélectionné pour passage en phase A par la JAXA. Constitué d'un satellite "mère" et de plusieurs satellites "filles" volant en formation en orbite autour de la Terre, SCOPE a des objectifs scientifiques proches de ceux de Cross-Scale, en particulier le couplage des échelles ionique et électronique dans les chocs et la reconnexion. La similarité des objectifs scientifiques et de la date de lancement des deux missions fait qu'une collaboration entre l'ESA et la JAXA est fortement souhaitable.

Projet structurant s'il en est, Cross Scale constitue le concept phare de la « communauté CLUSTER » pour l'avenir. Un accompagnement des développements R&T nécessaires dans la phase d'évaluation liée à « Cosmic Vision » est donc fortement soutenu par le groupe SHM.

Axe 4 : Météorologie de l'Espace et Relations Soleil/Climat

Pour des raisons encore plus évidentes qu'en 2004, la Météorologie de l'Espace et les relations Soleil/Climat sont au cœur d'un débat à fortes incidences sociétales. L'existence de variations de l'irradiance solaire sur des cycles longs et leurs possibles effets climatiques sur la Terre sont fortement débattus.

En ce qui concerne l'irradiance, le micro satellite PICARD fournira très probablement des résultats clés en mesurant simultanément l'irradiance totale, le diamètre ainsi que la forme du disque solaire. Ces mesures, obtenues tout au long de la mission permettront d'obtenir leurs variations au cours du cycle solaire.

En ce qui concerne la Météorologie de l'Espace, La limite longtemps tenue entre recherche fondamentale sur les relations Soleil-Terre et réinvestissement de ces recherches dans le domaine applicatif est peu à peu en train de s'estomper. Par exemple, les études menées sur la reconstruction du spectre solaire dans l'ultra-violet extrême à partir de la mesure de quelques bandes passantes, débouchent sur la proposition de développement d'un instrument opérationnel pour le suivi de la très grande variabilité de l'irradiance dans ce domaine spectral, variabilité ayant un impact important sur la caractérisation de l'ionosphère et de la thermosphère qui sont des régions clés pour l'orbitographie et les communications.

Ainsi, après plusieurs années de réflexion, les besoins en véritables produits dérivés et en savoir faire pour des applications sont en phase de concrétisation, notamment dans les domaines de l'espace et de la défense. Un Groupe de Travail « Météorologie de l'Espace » du CNES a dressé en 2005 un constat de la situation et émis une série de recommandations pour l'avenir, qu'il convient maintenant de poursuivre dans le cadre du Programme « Space Situation Awareness » de l'ESA (voir ci-après).

Pour finir il est important de noter que cet axe thématique offre une problématique de type 'historique' aux domaines 'SHM'. Les notions abordées sont à rapprocher de certains domaines de l'aéronomie des planètes comme par exemple la transformation lente, sur des temps cosmogoniques, des atmosphères planétaires en raison de leurs interactions avec le vent solaire et les populations solaires énergétiques.

Quelques découvertes et résultats récents

Résultats généraux concernant les mesures d'irradiance solaire.

Le satellite SORCE, lancé en 2003 et toujours opérationnel, a permis les premières observations de la variabilité du spectre solaire dans la gamme de longueurs d'ondes comprises entre 0.1 nm (domaine X) et 1600 nm (IR). Ces mesures ont révélé, pour la première fois, les différentes contributions de région spécifique du Soleil comme les facules, les taches, etc ... à la variabilité spectrale globale du Soleil, et ce sur des périodes allant de quelques jours à quelques années. Ces observations ont également démontré une importante cohérence spectrale de la variabilité et le rôle du champ magnétique sur cette

dernière. Ces résultats impliquent que la variabilité solaire pourrait être reconstruite à partir de l'observation de seulement quelques lignes spectrales judicieusement choisies. Cette technique est à l'étude et pourrait aboutir au développement d'un instrument spécifique

Effet des évènements solaires sur l'environnement terrestre

Lors d'une campagne de mesures coordonnées (28-30 mai 2003), entre les satellites SOHO et CLUSTER et les radars SuperDARN et EISCAT, a eu lieu un important orage magnétique. L'ensemble des données acquises a permis d'étudier la chronologie et les mécanismes de transmission des diverses perturbations engendrées par les éruptions solaires et les éjections de masse coronales associées : chocs interplanétaires, compression de la magnétosphère, intensification de la convection et des courants ionosphériques, jusqu'à l'effet pour les orbites de satellites basse altitude et les mesures GPS (Figure 5).

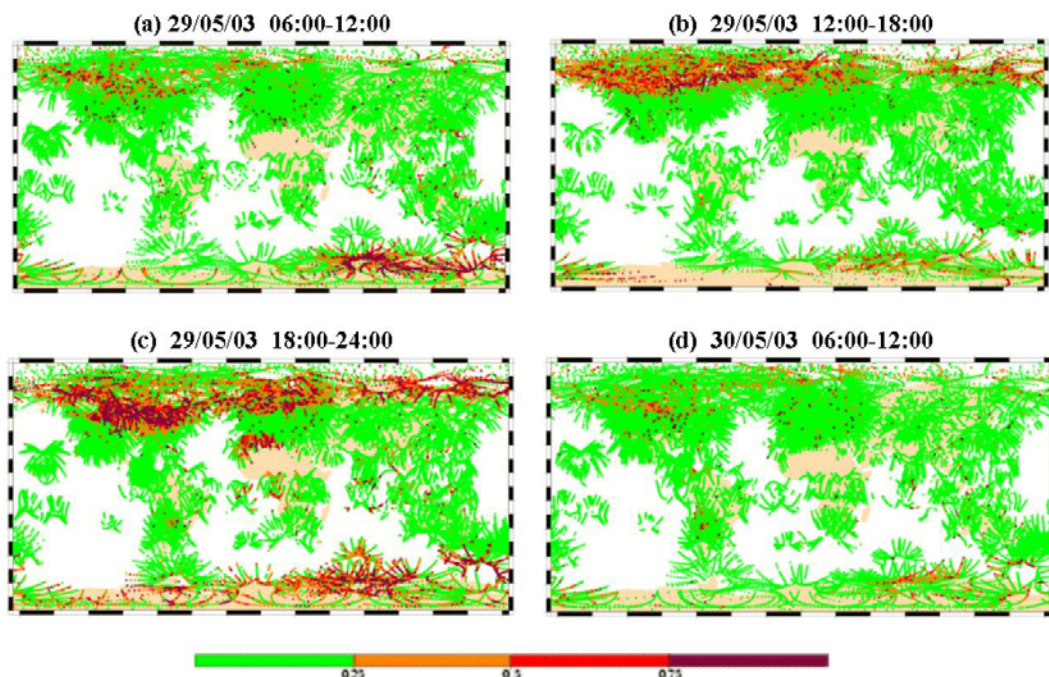


Figure 5 : Cartes de l'évolution de la scintillation radio GPS suite à la tempête géomagnétique du 29/052003. (crédit : Annales Gheophysicae)

Les éléments de la prospective

Les propositions soumises par la communauté et qui relèvent de l'axe scientifique 4 sont :

Etudes, R&T : *SESAME, SEES, Veille technologique dans le domaine X, g et IR, Surveillance radio solaire*

Participations à des missions d'opportunité : *KuaFu*

Exploitation scientifique du micro satellite PICARD :

Le microsatellite PICARD doit être lancé, en partageant un lancement avec le projet Suédois PRISMA, en fin d'année 2009, sur une orbite héliosynchrone plein soleil. Une équipe scientifique américaine prévoit d'effectuer des vols sous ballon d'un instrument existant pour mesurer de manière indépendante le diamètre du soleil pendant la mission PICARD. Si

ce programme pluri annuel est accepté par la NASA, il pourra évoluer vers un programme plus ambitieux franco-américain. L'exploitation des données de la mission se prépare activement dans les laboratoires scientifiques français, belges et suisses ayant contribué à l'instrumentation embarquée.

En fournissant un jeu de données très précis sur la variabilité, entre autres, de l'irradiance solaire totale et du flux UV, la mission PICARD représente une excellente opportunité d'étudier les différents mécanismes d'action solaire et, en particulier, les perturbations stratosphériques associées à la variabilité UV et leur propagation à la troposphère. Une double approche basée sur l'analyse de données et la modélisation couplée chimie-climat permettra de caractériser et de comprendre les liens entre la variabilité solaire et l'atmosphère. Une première activité sera consacrée à la caractérisation de l'impact de la variabilité solaire, essentiellement haute fréquence, sur l'atmosphère, en analysant conjointement les mesures PICARD aux données atmosphériques d'observations (composition chimique, température, vent,...). L'activité suivante sera consacrée à une étude des différents mécanismes d'action. Les données PICARD seront utilisées pour le forçage d'un modèle communautaire de chimie-climat (CCM) dont le premier paramètre d'entrée est le flux solaire au sommet de l'atmosphère. L'objectif final est d'aboutir à une vision physiquement cohérente de la variabilité atmosphérique associée à la variabilité solaire. Ces études permettront également d'évaluer la capacité du CCM à rendre compte des liens entre la variabilité solaire et l'atmosphère.

Le Programme « Space Situational Awareness » de l'ESA :

Lors de la conférence ministérielle ESA de novembre 2008, La France a confirmé sa participation au programme préparatoire de surveillance de l'espace ou littéralement de « connaissance de la situation dans l'espace » (Space Situational Awareness, SSA). Il s'agit d'établir un catalogue des satellites en orbites, d'assurer le suivi des débris spatiaux, de déterminer l'impact de l'environnement spatial (météo de l'espace) et d'observer les astéroïdes qui pourraient menacer la planète.

La météorologie de l'espace, partie intégrante des thématiques SHM comme cela a été souligné lors des précédents exercices de prospective, est appelée à se développer en Europe dans ce cadre. Le premier volet de ce programme (2009-2011) doit préparer un futur système opérationnel dans un horizon de 10 ans, qui se basera pour ce qui concerne la météo de l'espace, principalement sur les moyens terrestres existant (télescopes solaires, magnétomètres...) mais pourra aussi être complété par des capteurs spécifiques embarqués sur des satellites.

Parmi les réponses à l'appel à idées 2008, 3 propositions nous sont apparues comme pouvant relever de la participation française au volet météorologie de l'espace du programme SSA :

- la coordination des activités françaises en météo de l'espace dont le but est de valoriser les différents efforts entrepris dans ce domaine par les laboratoires français en coopération avec la société CLS et le CNES. Cette coordination devrait en

particulier se faire avec le PNST (Programme National Soleil-Terre de l'INSU) et le CDAOA (Commandement de la Défense Aérienne et des Opérations Aériennes de l'Armée de l'Air).

- la R&T autour d'un instrument à visée opérationnelle pour la mesure de l'irradiance solaire EUV-UV (proposition **SESAME**)
- et enfin la proposition d'étude de la physique de la magnétosphère interne à partir d'un ensemble de 4 satellites, dont le but ultime est la quantification de l'influence de l'activité solaire et magnétique sur les ceintures de radiation, régions où se situent les satellites géostationnaires (proposition **SEES**).

Bilan de la prospective SHM de 2004

Le Tableau ci-dessous dresse, de manière synthétique, le bilan de la prospective SHM de 2004.

Catégorie de projet	Projets	Recommandation 2004	Situation actuelle
Vol en formation	ASPICS		Proba3 dans cadre ESA
Micro satellites	PICARD	Lancement 2008	Lancement fin-2009 mais retard favorable du cycle solaire
	TARANIS LYOT/MIRAGES	Phases 0/A de 2 microsats	TARANIS en phase B SMESE en attente de début de phase B
Programme ESA	BepiColombo	Soutien au développement CU	Livraison des modèles de vol des instruments en 2011
	Solar Orbiter	Soutien au développement CU	Solar Orbiter est en compétition (M1/M2) dans le cadre du programme Cosmic Vision ESA
Missions d'opportunité	MMS, JUNO Solar Probe		Fournitures en cours pour MMS (2014) et Juno (2011) Attente de la sortie d'un AO SolarProbe+
	Archivage des données	Politique active d'utilisation et d'archivage des données	Réorientation du CDPP et signature d'un protocole CNES/INSU Préparation d'un protocole CNES/INSU sur MEDOC

Les priorités et recommandations du groupe SHM

Les priorités qui sont données dans cette section ne sont pas seulement l'aboutissement des discussions menées au sein de notre groupe depuis le mois de mai dernier. Elles résultent également d'une réflexion déjà engagée lors du précédent exercice de prospective de 2004, voire avant en ce qui concerne TARANIS.

Nous rappelons également, si besoin est, que ces recommandations sont essentiellement d'ordre scientifique, reposant sur l'excellence, la maturité des concepts, l'insertion dans les thématiques internationales. Les faisabilités technologiques ainsi que les opportunités programmatiques ont également été évaluées.

Les recommandations du groupe s'inscrivent totalement dans le découpage – micro satellites, programme obligatoire de l'ESA, missions d'opportunité – proposé lors du dernier colloque de prospective. Au delà d'un soutien fort du CNES au programme obligatoire de l'ESA dont le rôle structurant est fondamental pour la communauté, et aux missions d'opportunités des autres agences spatiales, le groupe réaffirme le besoin d'une programmation régulière de missions microsatesellites du CNES. Ces missions ciblées scientifiquement peuvent être mises en œuvre relativement rapidement. Elles sont des compléments très importants aux missions plus ambitieuses de l'ESA, mais à la programmation plus espacée et aux dérives d'implémentation fréquentes dans le temps. Ce gabarit de mission est également très bien adapté à des projets de type « test d'hypothèses » sur des sujets prometteurs, susceptibles de rassembler par la suite des communautés encore plus importantes.

Micro-satellites CNES

[R0] : Le projet TARANIS, soutenu par le groupe SHM depuis les deux derniers colloques de perspectives, a subi quelques retards dus à des difficultés de montage avec les partenaires historiques. La nouvelle organisation de l'équipe scientifique proposant l'instrument XGRE renforce l'implication de la communauté scientifique française, et permet donc de sécuriser complètement le montage du projet pour le déroulement des phases suivantes, tout en maintenant le statut de Co Investigateurs aux principaux scientifiques étrangers. Par ailleurs, le choix du détecteur retenu aujourd'hui (scintillateurs à base de LaBr3 développés par Saint Gobain) améliore les performances de l'instrument, renforce les objectifs scientifiques de XGRE et donc de l'ensemble du projet TARANIS. **Le groupe SHM recommande donc l'engagement, le plus tôt possible, en phase B2/C/D du projet TARANIS.**

[R1] : La mission SMESE comporte un ensemble d'instruments cohérent qui permettra des avancées notables dans la compréhension des éruptions solaires et des Ejections de Masse Coronale. Cette mission, qui fournira le seul coronographe disponible à l'horizon 2013, présente un fort potentiel de découverte en physique solaire (première mesures dans l'Infra-Rouge lointain, premières mesures directes du champ magnétique coronal ...). Suite au

retard de démarrage du cycle solaire 24, l'intérêt scientifique de la mission SMESE reste entier pour un lancement en 2013-2014 et ne se dégrade que progressivement pour un lancement plus tardif. Suivant les conclusions du groupe de revue de Phase A, **le groupe SHM recommande donc le passage, le plus tôt possible, en Phase B de la mission SMESE.**

[R2] : La mission bi-satellitaire IMEDIA a pour objectif de comprendre le fonctionnement de la zone de transition étroite entre l'ionosphère proche et dense de la Terre et sa magnétosphère lointaine et diluée (entre 1000 à 10000 km d'altitude). Au-delà du cas de la Terre, IMEDIA ouvre des perspectives astrophysiques en abordant la thématique de l'érosion ionosphérique qui, sur des temps géologiques, peut jouer un rôle majeur dans la biocompatibilité d'une planète similaire à la Terre. Une pré-étude de la DCT ayant conclu à la faisabilité probable de la mission, **le groupe SHM recommande une étude de phase 0/A pour IMEDIA.**

Programme obligatoire de l'ESA

Le groupe SHM souligne à nouveau le rôle fondamental pour la structuration de communauté française que joue le programme obligatoire de l'ESA dont, à l'inverse, la communauté contribue également à établir les priorités. **Le financement des charges utiles liées à ce programme nous paraît donc essentiel.**

Le groupe SHM recommande :

[R0] Un soutien fort du CNES au projet Bepi-Colombo de l'ESA ainsi que l'acceptation de son coût à achèvement, dès que la faisabilité technique de la mission est confirmée par l'ESA et les industriels.

[R1] L'engagement de la mission Solar Orbiter pour un lancement en 2017. Le groupe souligne également le besoin pour l'ESA d'annoncer le plus tôt possible la sélection de la charge utile afin de ne pas devoir annuler l'AO instrumental actuel et refaire le processus de sélection.

[R2] Un soutien à la R&T pour les missions en compétition en « Cosmic Vision » dans lesquelles la communauté SHM est impliquée : Cross Scale, Laplace/EJSM ou Tandem/TSSM (une seule de ces deux missions restera en principe en compétition au moment du séminaire)

[R3] Un support technique du CNES à une nouvelle soumission de la mission PHOIBOS (sonde solaire européenne) dans le cadre « Cosmic Vision 2 » si le projet américain Solar Probe Plus venait à disparaître du paysage programmatique d'ici là.

[R4] Un support technique du CNES, le moment venu, à une proposition de mission de type Observatoire Solaire dans le cadre « Cosmic Vision 2 » ou au-delà. Les objectifs scientifiques de cette mission sortiront de l'exercice de prospective de la communauté solaire, mené sous l'égide du PNST.

Participation à des missions d'opportunité, études et R&T

Les missions d'opportunité, solaire, magnétosphérique et planétologique, jouent un rôle crucial pour la communauté SHM et sont un complément indispensable au programme obligatoire de l'ESA. Les charges utiles qui sont listées ci-dessous se caractérisent par de multiples instruments de tailles et de coûts relativement modestes. Sur la base de participations « raisonnables », souvent bien moindres que 5 M€, il y a matière à réaliser, pour tout ou en partie, des instruments de tout premier ordre, à forte visibilité, capables de faire progresser en profondeur les thématiques SHM et ayant un rapport qualité/prix excellent.

Le groupe SHM recommande :

[R1] Le soutien pour la fourniture d'instrumentation pour la mission Solar Probe Plus de la NASA, dont un AO instrumental devrait intervenir avant mi 2009. Cette mission, qui reprend en grande partie le concept de sonde solaire soutenu depuis fort longtemps par SHM, présente une forte complémentarité scientifique avec Solar Orbiter.

[R2] Le soutien pour la fourniture d'instrumentation correspondant aux propositions des missions d'opportunité CIHR/Proba 3, KuaFu, Résonance.

[R3] Le soutien aux actions d'études et de R&T concernant les propositions suivantes, par ordre de priorité : SESAME, Mag-X et SEES.

[R4] Que le CNES mette en place un groupe de travail avec des représentants des différents organismes nationaux intéressés qui, sur la base des travaux de précédents groupes de réflexion, **propose une structuration des activités nationales qui puisse s'intégrer dans le futur programme « Space Situational Awareness » de l'ESA.**

[R5] La mise en place d'un groupe de travail CEA/CNES sur la caractérisation du bruit intrinsèque de l'instrument GOLF-NG. Cette action est nécessaire avant toute prise de décision quand à l'étude de phase 0/A d'un micro satellite CNES ayant pour objectif la mesure des modes G, dont le groupe SHM reconnaît l'apport fondamental pour la physique solaire.