

**Groupe Thématique Soleil-Héliosphère-Magnétosphère**

**DOCUMENT DE PROSPECTIVE**

**Aspects Scientifiques et Programmatiques**

**Septembre 2004**

Ce document synthétise les discussions menées au sein du groupe thématique Soleil-Héliosphère-Magnétosphère (SHM) lors de la préparation de l'exercice de prospective du printemps 2004. Deux séances plénières ont été tenues, en présence des représentants du Programme National Soleil/Terre de l'INSU, pour actualiser la partie scientifique de la prospective, évaluer les réponses à l'appel à idées CNES de Février 2004 et proposer un programme de missions et d'expériences spatiales pour les thématiques 'SHM' sur la période 2005 – 2020.

***Composition du groupe SHM :** Tahar Amari, Patrick Boumier, Thierry Dudok de Wit, Ludwig Klein, Rosine Lallement, Jean Lilensten, Philippe Louarn (Président), Valérie Masson-Delmotte, Jean-Yves Prado (secrétaire), Raymond Potelette, Laurence Rezeau , Jean-Claude Vial, Jean-Pierre Villain.*

## **PARTIE I – ASPECTS SCIENTIFIQUES**

L'état scientifique des domaines 'SHM' a été discuté de manière approfondie lors d'une séance spécifique du groupe tenue le 7/4/2004. Cet exercice était indispensable au moment où les résultats des missions **Soho** et **Cluster** s'engrangent et remodelent nos problématiques scientifiques. Nous en proposons un résumé sous la forme d'une liste non exhaustive de résultats 'phares' et de découvertes récentes qui permettent de dégager les orientations et les axes scientifiques majeurs de nos domaines.

*L'analyse de ces résultats met en avant des évolutions significatives dans la manière d'aborder la physique des milieux ionisés et d'appréhender la complexité des relations Soleil/Terre et Soleil/Planètes. Elles montrent le lien direct entre les progrès de ces domaines et ceux concernant des questions ouvertes de physique générale: turbulence et non-linéarités, formation et annihilation de structures, conceptualisation des interactions 'multi-échelles'. Elles révèlent l'impact 'sociétal' fort de certains des axes SHM : histoire des relations Soleil/Terre, rôle des interactions inter-couches dans les évolutions environnementales, météo spatiale. Enfin, elles confirment la force de découverte des thématiques SHM. Elle se démontre à chaque nouvelle exploration d'objets ou d'environnements du système solaire.*

C'est sur cette base scientifique qui ne renie en rien les questions scientifiques prioritaires définies lors de l'exercice de 2001 que notre stratégie expérimentale est proposée. Celle-ci s'articule évidemment avec les thèmes d'exploration généraux définis et proposés pour le programme 2015-2025 'Cosmic Vision' de l'ESA par le 'Solar System Working Group'.

### **1- Quelques découvertes et résultats récents.**

Nous énonçons ici une série de découvertes factuelles de la dernière décennie qui, à la fois, marquent des étapes cruciales de notre découverte des milieux du système solaire tout en démontrant le caractère encore parcellaire de la connaissance et de la compréhension que nous en avons.

#### **Physique solaire(intérieur et basse couronne):**

Rotation rigide du soleil le plus interne, plus lente que celle des régions externes à certaines latitudes - Mise en évidence de la tachocline et reconnaissance de son rôle dans les processus dynamo et la régulation des cycles - Circulation convective méridienne... *L'image d'un intérieur solaire extrêmement structuré où la dynamique de fines couches s'avère fondamentale s'impose aujourd'hui.*

#### **Figure 1**

En combinant la physique solaire et la physique des particules : validation du modèle de la machinerie solaire interne et mise en évidence des oscillations du neutrino et donc, *de sa masse éventuelle.*

Description des différents modes du vent solaire (rapide et lent) et leur lien avec l'activité solaire et des structures photosphériques particulières - Importance de la reconnexion aux différentes échelles dans le chauffage coronal – Description des ondes de Moreton qui est un précurseur des CME... *La structuration 'magnétique' de la photosphère, de la chromosphère et de la basse couronne est aujourd'hui reconnue comme cruciale dans les phénomènes de pertes de masse. De plus, les processus à très petites échelles s'avèrent fondamentaux pour le chauffage.*

### **Physique solaire (zone externe) et héliosphère:**

Mise en évidence des écarts de la couronne au modèle magnéto-hydrodynamique traditionnel : températures anisotropes et dépendant de l'espèce des particules, indiquant un rôle des ondes cyclotroniques dans le chauffage de la couronne - Identification d'écoulements systématiques vers le haut dès la basse couronne dans les trous coronaux, suggérant que le vent est accéléré dès la base de la couronne... *Ces mesures des paramètres détaillés du plasma coronal montrent l'importance des processus cinétiques dans le chauffage et le rôle fondamental de la très basse couronne pour l'accélération du vent.*

Progrès significatifs dans l'observation systématique des éjections de masse ('coronal mass ejection', CME) et des phénomènes associés dans la basse couronne, notamment des perturbations à grande échelle (« ondes EIT ») émanant des régions actives... *Les couplages entre instabilité à grande échelle et structuration magnétique à petite échelle sont pour la première fois accessibles aux observations.*

Présence systématique de populations non thermiques de particules dans le vent solaire et de processus explosifs d'accélération de particules dans la couronne, parfois à des énergies relativistes (atteinte du GeV en quelques secondes au maximum !)... *La notion d'atmosphère solaire 'calme' a perdu sa signification au profit d'une vision dynamique à toutes les échelles observables. Les mécanismes d'accélération du soleil éruptif sont très divers et extraordinairement efficaces. Cette efficacité n'est pas comprise.*

### **Figure 2**

Détection des neutres et des 'pick-up' d'origine interplanétaire; premières contraintes expérimentales concernant l'interaction héliosphère/galaxie... *L'étude in-situ de l'interaction héliosphère/milieu interstellaire/galaxie commence.*

### **Magnétosphères terrestres et planétaires:**

Identification des échelles physiques des chocs dans les plasmas sans collision - Structuration 3D systématique des couches de courants magnétosphériques et caractères 3D de la reconnexion - Physique de l'accélération: rôle relatif des ondes d'Alfvén, des champs électrostatiques de grande échelles, des structures microscopiques - Caractérisation de la turbulence et évolution non-linéaire des ondes d'Alfvén; avec Cluster: mesure des courants ('curlometer') et décomposition spectrale ('k-filtering')... *La dernière génération de satellites magnétosphériques ouvre effectivement des perspectives entièrement nouvelles d'analyses de la dynamique des plasmas spatiaux. Topologie 3D et structuration microscopique en sont des éléments fondamentaux.*

### **Figure 3**

Premières applications de 'l'imagerie neutre' - Avec Galileo: découverte de nouveaux cycles d'activité à Jupiter, liés à des relaxations rapides d'énergie de rotation dans la magnétosphère - Interactions magnétosphère/satellites - Découverte de la première magnétosphère propre d'un satellite (Ganymède)... *Les environnements planétaires sont des terrains privilégiés d'études de phénomènes et de processus nouveaux.*

### **Ionosphère, thermosphère, exosphère:**

Les éruptions solaires intenses de Novembre 2003 ont été propices à des résultats remarquables: formation de 'bulles' de plasma à basses altitudes (60 km !), génération de molécules NO<sub>x</sub>, diminutions fortes de l'ozone (70 %) lors des événements à proton... *Que de tels phénomènes puissent encore être découverts dans notre proche environnement, que des processus aussi intenses que les 'sprites' soient juste décrits sont de remarquables exemples de la vitalité et du potentiel ouvert de ces domaines.*

#### **Figure 4**

La décennie a été aussi celle de la mise au point des modèles de couplages globaux: atmosphère/thermosphère/ionosphère/magnétosphère et du début de leurs tests expérimentaux. Ces domaines recouvrent également les thématiques '*météorologie spatiale*'.

Au chapitre planétaire, avec Galileo, les premiers résultats MarsExpress et Cassini, de nouveaux chapitres sont en train de s'ouvrir concernant l'aéronomie, la physico/chimie exosphérique et les processus de sputtering... *Par exemple, avec MarsExpress, la réalité de l'érosion de l'atmosphère martienne due à l'action du vent solaire commence à être quantifiée.*

## **2- Les grands axes 'SHM'.**

L'analyse de ces résultats et des stratégies scientifiques qui en ont permis l'émergence permet de dégager **trois axes majeurs**, potentiellement les plus aptes à faire progresser les disciplines 'SHM' et, par extension d'autres domaines:

### **Axe 1: Interactions 'Inter-Echelle', Turbulence et Non-linéarités.**

Cet axe relève de problématiques générales de la physique. Rappelons cependant que les plasmas ne peuvent pas être assimilés aux fluides classiques (liquides et gaz). Une difficulté essentielle provient de l'absence d'équations 'constitutives' raisonnablement générales et adéquates pour relier la physique des petites échelles à celles des évolutions macroscopiques. Ces milieux sont souvent sans collision et des notions relevant par exemple de la diffusivité, compressibilité, viscosité, adiabaticité n'ont pas de raison d'être a priori.

Aujourd'hui, quelques énoncés généraux s'imposent concernant la physique des milieux du système solaire représentatifs des environnements ionisés et/ou peu denses existant partout dans l'univers:

**a) La structuration spatiale des milieux ionisés et magnétisés est l'élément primordial de leur dynamique et de leur activité.** Cette structuration, 3D dans la plupart des cas, régit par exemple les processus de création et d'annihilation des champs magnétiques.

Cette structuration est évolutive, avec des échelles temporelles s'étalant sur de nombreux ordres de grandeurs, des temps 'électroniques' aux temps d'émergences 'MHD'. Avec la propagation des 'chocs', les processus d'annihilation apparaissent de plus en plus être centraux dans tous les mécanismes d'accélération et de chauffage des particules.

b) **L'activité de ces milieux met systématiquement en œuvre des modifications microscopiques de l'état du plasma.** Que la structuration spatiale ne rende pas compte seule des phénomènes observés est une des leçons récentes de l'exploration in-situ. Les bases de ces modifications microscopiques peuvent être: la génération de structures spatio-temporelle cohérentes, le développement d'une turbulence et/ou des interactions ondes/particules plus ou moins cohérente. Ces modifications microscopiques régulent très vraisemblablement le développement de l'activité et fixent la part relative du chauffage, de l'accélération et du rayonnement résultant du transfert énergétique.

c) **On ne peut comprendre la dynamique de ces milieux en isolant les structures (arche coronale, queue magnétique, disque en rotation, jet, etc...) de leur contexte et en négligeant les conditions de leur formation.** Le rôle des conditions aux limites et des interactions entre les différentes régions d'un environnement paraît maintenant fondamental. L'examen des instabilités propres de structures isolées et idéalisées ne peut donner la clef de la compréhension de la dynamique de ces milieux.

**AXE 1 : Conceptualisation des interactions 'multi-échelles' et des liens entre 'micro' et 'macro'-physique, Formation et annihilation des structures 3D, Turbulence et dynamique des systèmes complexes sont des thèmes scientifiques majeurs des disciplines 'SHM' qui relèvent tous de la physique fondamentale.**

Tout progrès dans ces domaines aura un impact direct sur la résolution des problèmes 'SHM' classiques: dynamo solaire, structuration de l'intérieur solaire, chauffage de la couronne, génération des différents vents, accélération et chauffage des ions et des électrons, équilibres magnétiques et reconnexion, sous-orages et dissipations explosives d'énergies, chocs, interactions avec les populations neutres. Les applications à d'autres domaines astrophysiques sont évidentes. On doit également noter que les problématiques traitées sous cet angle sont souvent connectées à celles de la physique des plasmas de laboratoire et de fusion.

*La difficulté de ces thématiques justifie une approche expérimentale ambitieuse qui allie (1) l'analyse 3D multi-échelle et (2) la haute résolution temporelle. Cette approche concerne tout autant l'analyse in-situ du milieu spatial que l'observation 'à distance' de l'environnement et de la surface solaire.*

## **Axe 2: Exploration et connaissance des environnements.**

L'étude et l'analyse des environnements des objets du système solaire restent complètement d'actualité. **L'existence d'un potentiel de découvertes**, posant de réelles questions relevant de la compréhension des processus physico/chimique sous-jacents, **est démontré à chaque nouvelle exploration**. Ceci concerne aussi un milieu pourtant bien étudié: l'environnement terrestre. La raison principale en est la complexité des relations 'inter-régions' ou inter-couches' de ces environnements et leur rôle primordial dans la dynamique.

**AXE 2 : L'analyse et la compréhension des interactions 'inter-couches' des environnements du système solaire, en premier chef de la Terre et du Soleil mais aussi des planètes, est un axe fondamental de la prospective 'SHM'. Cet axe rejoint les préoccupations de 'Météo de l'espace'.**

*L'exploration des objets et des environnements du système solaire est un élément essentiel de la stratégie expérimentale de 'SHM'.*

Aujourd'hui, cet axe concerne en premier chef des missions comme MarsExpress, Cassini et dans un avenir proche Stereo. Dans chaque cas, l'effort expérimental s'accompagne d'un travail de mise au point de modèles numériques et de simulations spécifiques.

### **Axe 3: Histoire des relations soleil/planètes, Climatologie et cycles solaires longs.**

Pour des raisons évidentes, ce domaine est actuellement en pleine explosion. L'existence de variations de l'irradiance solaire sur des cycles longs et de leurs possibles effets climatiques est le cœur d'un débat à fortes incidences sociétales. Ces sujets offrent une problématique de type 'historique' aux domaines 'SHM'. Ils 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.

Ces questions rejoignent aussi des interrogations fondamentales portant sur la vie dans l'univers. D'un certain point de vue, l'apparition, le développement et le maintien de la vie peuvent être perçus comme les résultats d'une relation privilégiée entre une source d'énergie (une étoile) et un substrat (une planète et sa chimie intrinsèque). L'étude de ces relations a un lien avec les thématiques 'SHM', même si d'évidence les effets solaires ne sont qu'un des nombreux facteurs affectant les environnements.

**AXE 3 : Les évolutions 'long terme' des environnements ont une dimension relevant des interactions Soleil/Terre et Soleil/Planète. L'étude et la compréhension des processus régulateurs de ces interactions, permettant le développement et le maintien de la vie, sont des axes prospectifs forts pour les disciplines 'SHM'.**

*La stratégie expérimentale 'SHM' doit prendre en compte la dimension 'long terme' des interactions soleil/terre et soleil/planètes. Cela justifie un aspect 'surveillance' des expériences.*

### **3- Eléments d'une stratégie expérimentale.**

Les thématiques 'SHM' ont depuis plus de 40 ans bénéficié des avancées de l'exploration spatiale et il est donc tout à fait normal qu'elles atteignent des degrés de maturité tels que les études paraissent parfois être des raffinements de sujets scientifiquement clos. L'inverse poserait problème ! Effectivement, la description des grandes régions de l'environnement terrestre, solaire et héliosphérique est faite. De même, les processus qui relèvent de la physique linéaire en milieux homogènes ne paraissent plus réserver de surprise. Cependant, pour tout le reste: théories non-linéaires, turbulence, relations inter-couches et couplages entre régions d'un environnement, dynamique de l'intérieur solaire, histoire des relations inter-

environnements... des travaux expérimentaux, théoriques et de simulations de tout premier ordre s'imposent. Leurs connexions avec certaines problématiques de la physique fondamentale, l'importance des réponses qui pourront être apportées relativement à d'autres domaines de l'astrophysique et leur portée environnementale justifient une stratégie d'expérimentation spatiale à partir des principes suivants:

**1) La résolution des problèmes parmi les plus ardues des disciplines 'SHM' (Axe 1) passe par l'exploration in-situ, multi-satellite et à haute résolution temporelle des milieux spatiaux.**

Au niveau européen, la réflexion portant sur la définition de la génération 'Post-Cluster' est en train d'être menée. La seule voie scientifiquement légitime et d'ailleurs largement consensuelle est celle de l'exploration multi-échelle et à haute résolution temporelle. Après CLUSTER, le projet NASA MMS est une première réponse qui traite plus particulièrement de l'aspect haute résolution temporelle.

La notion d'exploration multi-échelle a suscité des réponses au 'Call for Themes' de l'ESA et le SSWG en a fait un thème de toute première priorité dans le cadre de 'Cosmic Vision'.

*Cette voie expérimentale n'a pas encore sa pleine perspective programmatique. Elle sous-entend la conception de missions de type 'Constellation' et repose peut-être sur une association entre les grandes agences: ESA, NASA et/ou JAXA...*

**Au même titre, l'observation à haute résolution temporelle et spatiale de processus dynamiques solaires est un outil unique de saisie 'instantanée' des évolutions topologique 3D complexes des environnements.**

Il s'agit également d'un thème prioritaire pour 'Cosmic Vision'.

*Le concept de 'vol en formation' pourrait offrir des solutions expérimentales très prometteuses dans ce domaine (interférométrie, coronographie).*

**2) Des découvertes et des progrès fondamentaux sont à attendre de l'observation à distance et l'exploration directe d'environnements extrêmes ou originaux (Axe 2).**

On place dans cette catégorie les projets ESA: **Bepi Colombo et Solar Orbiter**. On peut aussi penser à l'exploration de la proche couronne solaire (**Sonde Solaire**), au retour dans cet extraordinaire objet qu'est la magnétosphère de Jupiter (**JIMO et JUNO**) et à l'étude des régions les plus lointaines de l'héliosphère.

La notion d'exploration du système solaire externe, incluant l'étude de l'environnement de Jupiter et des frontières héliosphériques, est aussi un des forts thèmes prioritaires exprimées par le SSWG pour le programme 'Cosmic Vision'.

*Cette voie expérimentale concerne la participation aux projets majeurs, en partie programmés, des grandes agences: ESA, NASA et JAXA.*

**3) Sur la base de concepts instrumentaux de dernière génération et optimisés, il y a place dans les domaines 'SHM' pour des missions de 'petite taille', envisageable dans un cadre national ou bi-latéral. Bien conçues, ces missions permettraient des premières mondiales.**

De telles missions peuvent concerner: la détection des modes héliosphériques profonds, l'étude de certains processus solaires à des longueurs d'ondes ou des gammes d'énergies inusitées, la surveillance de l'environnement et de l'activité solaire, des études de processus spécifiques dans l'environnement terrestre, l'étude des relations 'soleil/planète' concernant des objets proches (**Axe 3**).

*Cette voie expérimentale est parfaitement adaptée au concept 'micro-satellite'. Des possibilités seraient également offertes dans le cadre de micro/nano satellites spinnés, hélas non développés par le CNES.*

## **PARTIE II – ASPECTS PROGRAMMATIQUES**

### **1- Projets 'SHM' et besoins de la communauté.**

L'appel à idées a généré 26 réponses (voir leur description individuelle en annexe) qui se répartissent ainsi:

#### **Types de projets :**

- Vol en Formation (3 projets): *ASPICS, ISIS, PARIS*
- Micro-Satellites 'CNES' (6 projets): *Eruptions IR (ex Mirage), GolfNG, Lyot, Halfa, Taranis, Vigiwind*
- Micro-Satellites 'Spinné' (3 projets): *RBM, Sentinelle, Spoc*
- Mission de type 'Constellation' (3 projets): *Storms, Imedia, Herakles*
- Participation à des missions d'opportunité (essentiellement NASA) (5 projets, au moins...): *Résonance, Safari, Helix, SondeSOLAIRE, JIMO*
- Petites expériences (3 projets): *Expri, Fusées sondes et Ballons, LSO*

L'analyse de ces réponses doit prendre en compte les projets existants par ailleurs: *Picard* (micro CNES), *BepiColombo* et *SolarOrbiter* (ESA), *Stereo* et *MMS* (NASA); les participations aux projets 'planétologie': *MarsExpress, VénusExpress* et *Cassini*; l'exploitation actuelle des projets phares de 'SHM': *Cluster* et *Soho*.

#### **Répartition thématique:**

- Soleil 'intérieur et couches externes', vent solaire:
  - Eruptions IR, GolfNG, Lyot, Halfa, Vigiwind* (micro CNES)
  - ASPICS* (vol en formation)
  - Stereo, Safari, Helix, SondeSolaire* (NASA)
  - SolarOrbiter* (ESA)
- Planétologie:
  - VénusExpress, BepiColombo* (ESA)
  - JIMO, JUNO* (NASA)
- Magnétosphère, plasmas spatiaux:
  - RBM, Sentinelle, Spoc* (micro spinné)
  - Storms, Imedia, Herakles* ('Constellations')

<i>MMS</i>	(NASA)
- Environnement terrestre: <i>ISIS</i> <i>Taranis, LSO</i>	(Vol en formation) (Micro, petite exp.)
- Interférométrie BF: <i>PARIS, Expri</i>	(Vol en formation et petite exp.)

### **Besoins des domaines 'SHM'.**

La liste de ces projets traduit les besoins scientifiques de la communauté 'SHM'. Mis à part les 'vols en constellation' ou 'en formation', les projets ou les expériences 'SHM' restent d'échelles relativement modestes. Les objets à étudier sont proches, brillants, et les surfaces collectrices de photons peuvent donc être relativement réduites. Ce commentaire s'applique également aux détecteurs de particules et aux études 'in-situ'.

**1) La filière 'micro-satellite'** suscite des réponses nombreuses présentant dans la plupart des cas un **intérêt scientifique de premier ordre**. Dans sa forme première - **mission à bas coût et faible temps de gestation** - ce concept comble en effet un manque réel des grandes agences (de l'ESA en particulier) et **offre des opportunités d'études originales aux scientifiques**. C'est actuellement en Europe une des rares solutions équivalente aux SMEX/MIDEX de la NASA.

**2) Les grandes agences ont un rôle fondamental à jouer** puisque c'est à leur niveau que **les scientifiques définissent leurs missions les plus ambitieuses**. Comme tous les autres domaines, les communautés 'SHM' sont donc porteuses ou comptent participer à des missions d'avenir, concernant l'approche du soleil (SolarO, SolarP), le retour aux planètes géantes (JIMO, JUNO) et l'analyse multipoint du milieu spatial (vol en constellation).

**3) Les missions d'opportunité, solaire, magnétosphérique et planétologique, jouent un rôle crucial pour 'SHM'**. Les charges utiles 'SHM', comparable en cela aux projets planétologiques, se caractérisent par de multiples instruments de tailles et de coûts relativement modestes. Sur la base de participations 'raisonnables', souvent bien moindres que 5 ME, il y a matière à réaliser, pour tout ou en partie, des instruments de tout premier ordre, capables de faire progresser en profondeur les thématiques 'SHM'.

**4) Concernant l'exploration in-situ, il y aurait place pour la conception de 'nano'-satellite** (gamme < 100 kg). Envisagé sous la forme de '**constellation**', impliquant un fort niveau de mise en réseau pour l'optimisation automatique des modes opératoires et la gestion du flux de données, la conception de tels satellites et de telles missions nous paraît constituer un axe de RetT prometteur dont les applications dépassent sans doute largement le domaine 'SHM'. De tels projets sont discutés dans la communauté dans une perspective 'Post-Cluster' (Cosmic Vision).

**5) Le concept de 'vol en formation'** a suscité quelques réponses, avec cependant parfois une difficulté à distinguer 'vol en formation' et 'vol en constellation'. Les projets d'interférométrie proposés ou qui auraient pu l'être n'ont pas de spécificité 'SHM' particulière. Seul le projet de

coronographie 'Aspics' se distingue de ce point de vue. La science 'in-situ' n'a pas proposé de mission 'vol en formation'.

## **2-Evaluation programmatique et recommandations.**

L'évaluation a visé essentiellement la définition des priorités concernant le vol en formation et les micro-satellites CNES. Les missions d'opportunité ont été discutées, l'ordre de grandeur des possibles implications financières a été estimé sans que des avis ou des recommandations formelles soient néanmoins émis.

### **2.1 Vol en formation:**

Trois projets ont été proposés:

- **Paris**, consacré à l'interférométrie radio basse fréquence
- **Isis**, pour des études tomographiques de l'ionosphère visant l'analyse d'ondes sismiques
- **Aspics**, projet de coronographie de la très basse couronne solaire (1.01 Rs).

Suivant la définition de nos axes majeurs, ces trois projets sont séduisants scientifiquement. En effet, avec l'interférométrie BF, on peut étudier la dynamique d'environnements ionisés lointains (dimension exploratoire), la tomographie ionosphérique est une technique novatrice d'étude de notre environnement proche (couplages 'inter-couches') enfin, la coronographie 'basse-altitude' est particulièrement bien adaptée à l'étude de la basse couronne, de sa structuration et de ses inhomogénéités et des interactions inter-couches dont nous avons souligné le caractère crucial.

Le groupe note cependant qu'à la fois pour **Paris** et **Isis**, le problème technique est l'excellente connaissance de la position réciproque des satellites plutôt que son véritable contrôle. Ils ne sont donc pas véritablement liés au concept 'vol en formation'. A l'inverse, **Aspics** est un projet qui répond tout à fait à ce concept. Il s'inscrit dans nos axes majeurs (axes 1 et 2), il est donc au coeur des préoccupations SHM.

**Aspics** demande en effet le respect d'une distance inter-satellite de l'ordre de 100 m, avec une précision de quelques 10 cm en direction longitudinale et du mm en direction transverse. D'un point de vue scientifique, il permettra l'analyse des couplages 'inter-couche' de l'environnement solaire, plus particulièrement de la région de transition située à quelques milliers de kilomètres de la surface et correspondant à un très fort gradient de température. Cette zone de transition et, plus généralement, la très basse couronne sont des régions très peu observées de l'environnement solaire car inaccessibles aux coronographes classiques. Ces régions jouent pourtant un rôle clef dans les processus de déclenchement d'éruption solaire, de CME et de déstabilisation de structures coronales.

La technique de 'vol en formation' s'avère donc particulièrement bien adaptée à l'étude de la basse couronne solaire, de sa structuration et des interactions inter-couches dont nous avons souligné le caractère crucial lors de notre débat général sur les aspects scientifiques de notre prospective.

**(R1) Nous faisons d'Aspics notre priorité. Nous insistons sur le fait que sa charge utile peut être optimisée pour permettre des avancées scientifiques même si la tenue du 'vol**

**en formation' s'avère délicate. Ce projet doit pouvoir se réaliser dans une enveloppe limitée, à l'intérieur d'un budget correspondant à la partie basse de la fourchette envisagée.**

## **2.2 Micro-Satellites:**

Nous dissociions l'avis sur **Picard**, projet qui était prioritaire lors de la prospective de 1998 (Arcachon) et dont la réalisation aurait du être effective sans son 'gel' décidé en 2001, des autres projets dont le niveau de maturité était, au mieux, celui de pré-phase A en 2001.

### **(R2) : Picard:**

Le groupe juge utile de rappeler que Picard est issu d'une recommandation de l'exercice de prospective d'Arcachon (1998) portée par le groupe TAOB. Ce projet a été conçu pour la mesure des évolutions de l'irradiance solaire, à partir du suivi des variations du diamètre solaire, cela à des fins d'études à long terme des facteurs pouvant influencer les évolutions climatiques. Ce n'est qu'en 2001 que le groupe SHM a été appelé à considérer Picard pour en analyser le possible intérêt en physique solaire. Depuis, la communauté TAOB, devenue TOSCA, semble s'être éloignée de ce projet.

*Pour sa part, le groupe SHM a toujours considéré que les mesures des variations de l'irradiance et du rayon solaire ont une forte pertinence scientifique. Il défend donc le volet 'physique solaire' de ce projet, notant en particulier que l'amplification des modes d'oscillation attendue au voisinage du limbe constitue une piste très intéressante pour déceler les modes profonds du soleil.* Il souligne cependant qu'un report de mission au delà de 2008 serait dommageable: en effet, l'évolution lente du diamètre ne peut être mesurée qu'en utilisant une durée aussi étendue que possible entre les extrêmes du cycle d'activité solaire. En 2008, le minimum d'activité solaire aura été dépassé d'après les prévisions actuelles.

Le groupe estime que cette mission relève fondamentalement d'activités transversales impliquant une partie des communautés SHM et TOSCA. La consolidation de ces activités nous paraît être indispensable au bon rendu scientifique de la mission Picard.

## **Propositions Micro-Satellites:**

**(R3) : Les filières 'micro' et 'mini' satellites présentent un très fort intérêt scientifique qui a toujours été souligné par le groupe SHM. Nous estimons en particulier que la filière 'micro', conçue dans sa forme première comme étant celle des missions à bas coût et faible temps de gestation, comble un manque réel des grandes agences (ESA). Elles offrent des opportunités d'études originales, très ciblées et permettant des premières scientifiques de niveau mondial. Nous insistons sur la diversité et la richesse scientifique des propositions micro-satellites qui nous sont parvenues. Elles sont des preuves de la justesse de la conception de cette filière par le CNES et en justifient largement, d'un point de vue scientifique, la pérennisation.**

Le groupe distingue **Taranis, Lyot et Mirage**, trois projets parfaitement adaptés au concept de micro-satellite CNES et qui n'ont pas d'équivalents internationaux. Le groupe note leur

excellence scientifique et le fait que leur charge utile ne devrait pas poser de problème de conception et de réalisation.

Il s'agit donc de projets originaux, mûrs, capables de générer des avancées scientifiques très significatives concernant: (a) la compréhension des phénomènes énergétiques totalement originaux à l'interface atmosphère/thermosphère/ionosphère. (b) l'étude des couplages chromosphère /couronne pour laquelle la raie Ly $\alpha$  est la mieux adaptée, (c) l'étude des processus d'accélération les plus extrêmes du soleil.

Les communautés à la base de ces propositions regroupent tous les laboratoires français concernés par ce type de science, avec donc des équipes scientifiques conséquentes (20-30 chercheurs dans le cas de Taranis). Ces projets sont également largement ouverts aux collaborations européennes et internationales.

**(R4) Nous recommandons une analyse de phase 0/A de 2 micro-satellites :**

**(1) Taranis**, considéré comme un **projet mûr**, sur des **thématiques en 'pleine explosion'** aujourd'hui, dont l'impact scientifique dépasse le cadre SHM classique et devrait également intéresser des spécialistes de l'atmosphère. Elles concernent aussi bien des processus d'accélération et de rayonnements qui restent à décrypter que leurs effets sur la chimie stratosphérique. **Taranis s'inscrit dans un créneau scientifique original qui n'a aucun équivalent international.** Le soutien massif que manifeste la communauté à l'égard de ce projet est à souligner.

Le groupe SHM rappelle la recommandation du CPS du 18 janvier 2002 : *Le Comité souligne le caractère tout à fait innovant de l'expérience Taranis qui s'appuie sur un dispositif expérimental cohérent permettant de comprendre et quantifier les processus explosifs de conversion d'énergie au dessus des orages. Il note que si cette expérience est effectivement développée dans les délais appropriés, elle constituera une première au niveau mondial.*

**(2) Un projet de physique solaire** dont une composante forte serait **l'instrumentation Ly- $\alpha$** . Une analyse scientifique et technique portant sur l'implémentation d'autres instruments est recommandée. **La charge utile définitive pourrait ainsi prendre en compte les mesures d'irradiance solaire (radiomètre, présent sur Picard) et/ou certains des objectifs de Mirage (Imagerie IR en particulier)** La communauté disposerait alors d'un projet d'étude des processus solaires **à des longueurs d'ondes inusitées, original et complémentaire des missions passées ou prévues comme SDO et Solar Orbiteur.**

Les lancements de ces satellites devraient intervenir **dans un créneau 2008-11**, en particulier pour des opérations lors du prochain maximum solaire ou peu de temps après.

Concernant la proposition d'héliosismologie **GOLFNG**, le groupe SHM rappelle à quel point les techniques d'héliosismologie ont largement démontré leur potentiel scientifique unique. Elles sont fondamentales pour la compréhension de la structure interne du soleil, de sa dynamique, de son fonctionnement et de ses cycles. Il s'agit donc de la compréhension de la machinerie interne du soleil et des différents processus expliquant son magnétisme, facteur déterminant de son activité.

GOLFNG est un projet d'héliosismologie ambitieux qui vise l'étude du coeur solaire, y compris de sa variabilité. Cet objectif passe par la détection des modes g, ie des modes qui véhiculent l'information des couches les plus profondes. Ces modes, évanescents dans la zone convective, s'avèrent avoir des amplitudes "observables" très faibles, bien inférieures au mm/s selon certains modèles. La difficulté de détection de ces modes est donc très sérieuse ; elle est

intrinsèque au fort niveau de bruit turbulent du soleil dans les gammes de fréquences concernées. Pour tenter de réduire ce bruit, GOLFNG est un spectromètre à résonance de nouvelle génération, proposant sur une analyse multipoint des flancs de la raie du sodium (15 points prévues pour GolfNG au lieu de 2 effectives pour GOLF). Le principe est fondé sur l'analyse de la corrélation des déplacements doppler mesurés à différentes hauteurs dans l'atmosphère solaire. Le groupe note l'effort récent de démonstration de la capacité à réduire le bruit solaire, par une application limitée de la méthode à des données de GOLF.

Il nous semble que la difficulté de l'objectif affiché oblige à une poursuite de cette analyse de faisabilité. La RetT financée par le CNES paraît avoir permis de résoudre certaines difficultés instrumentales. Le prototype qui semble donc aujourd'hui proche de sa réalisation effective doit être utilisé pour, à partir de mesures sols, aider à cerner dans quelle mesure le bruit solaire peut être suffisamment réduit pour permettre la détection des modes recherchés. Ces tests devraient s'accompagner d'un effort de modélisation de l'instrument et de la technique d'analyse proposée.

### **3) Programme ESA:**

Le groupe a pris connaissance des dernières recommandations du SSAC (réunion du 19/05/2004). Il se félicite de la prise en compte officielle de **SolarOrbiter** dans le programme scientifique obligatoire, avec un lancement préconisé pour 2013, suivant donc **BepiColombo** en 2012

Le groupe considère aussi avec beaucoup d'intérêt la mention faite dans le même rapport du SSAC de  **futures missions magnétosphériques multi-satellites** au sein de l'ESA. Le '**vol en constellation**' est la voie d'avenir pour l'étude in-situ des milieux du système solaire. Une réflexion sur les mission 'post-Cluster' se fait aujourd'hui dans la communauté 'SHM' européenne pour définir un cadre programmatique 'ESA' post 2015.

Ce concept a fait l'objet de plusieurs réponses au '**Call for themes**' de l'ESA. Notons aussi qu'une session sur les missions post-cluster sera organisée au prochain colloque de l'EGU (Vienne 2005). La communauté solaire a également répondu à cet appel de l'ESA, avec en particulier la proposition Helios qui préconise une stratégie complète d'étude à distance et in-situ du soleil et son proche environnement. Enfin, l'étude de l'environnement de Jupiter et l'exploration des frontières héliosphériques ont également fait l'objet de réponses. Ces thèmes ont été classés au plus au niveau de priorité par le SSWG (colloque de septembre 2004 à Paris).

**(R5) Le soutien à la réalisation des charges utiles des projets ESA doit être un élément intangible du programme scientifique du CNES. C'est bien au sein de l'ESA que peuvent se mener les projets les plus ambitieux de la communauté.**

### **4) Programme NASA et autres**

Le programme NASA est actuellement relativement incertain. En principe, des missions d'opportunité existent, en premier lieu **MMS**, pour laquelle deux consortium ont été sélectionnés pour une phase A approfondie, chacun comportant des équipes françaises.

Même si aujourd'hui toute contribution au 'hardware' de **SDO** est exclue, ce projet est une mission d'opportunité tout à fait fondamentale pour la communauté solaire. **Les implications au niveau de l'acquisition des données de SDO et à leur exploitation doivent absolument être soutenues par le CNES.**

Le groupe suit avec la plus grande attention le redémarrage du projet **SolarProbe** et les développements concernant de futures missions de retour dans l'environnement de Jupiter (**JIMO, JUNO**). **Solar Probe** et **JIMO (JUNO)** seraient des missions d'opportunité de tout premier intérêt.

Par ailleurs, un certain nombre de propositions **MIDEX** apparaissent être tout à fait intéressantes (**Safari, Helix...**).

**(R6)** La possibilité de participer, même de manière réduite (moins de 1 ME), à **la réalisation des charges utiles de projets d'opportunité NASA (et autres) a toujours été un élément fort de la programmation 'SHM'**. Cette possibilité repose pour l'essentiel sur (1) les expertises 'hardware' qu'ont pu développer les laboratoires, souvent sur la base d'initiatives de RetT soutenues par le CNES, et (2) leur fiabilité budgétaire et calendaire dans la conduite des réalisations instrumentales. **Il s'agit de points fondamentaux à préserver et renforcer.**

Concernant les missions d'opportunité, des initiatives sont possibles de la part du CNES pour apporter, à faible coût, une aide 'système' aux projets sous la forme par exemple d'une fourniture d'**antennes de réception** (station d'Aussaguel). C'est aussi un moyen d'impliquer les scientifiques à des projets, à un rapport qualité/prix excellent.

## **5) Estimation Budgétaire**

Hors 'vol en formation' et à partir des éléments connus, un programme 'SHM' satisfaisant et raisonnable aurait les incidences budgétaires suivantes (sur la période 2005-2020) :

**(R7)**

<b>2 Micro-satellites (prévus d'ici 2011-12):</b>	<b>35-40 ME</b>
<b>Participation ESA (Bepi C (MMO) + Solar 0) (période 2005-2013)</b>	<b>20-25 ME</b>
<b>Missions, Constellations ESA (post 2012)</b>	<b>20-25 ME</b>
<b>Mission d'opportunité (MMS, SolarP., JIMO, Hélios...</b> )	<b>20-25 ME</b>

Soit un total de l'ordre de 80-110 ME couvrant globalement la période 2005- 2020 (15 ans). Cette somme se répartie de manière sensiblement égale entre les composantes solaires et magnétosphériques.

**(R8)** L'optimisation du rendu scientifique de ces projets passe par une politique active pour le soutien (1) du **dépouillement et de l'exploitation** (CDD et Post-Doc), (2) de **l'archivage des données**. **Le soutien du CNES à ces activités est fondamental.**

## ANNEXE: **Présentations individuelles des réponses à l'AI**

Cet annexe explicite les principaux objectifs scientifiques des projets reçus par le groupe à la suite de l'Appel à Idées lancé en Février 2004 par le CNES.

### **A- SOLEIL INTERNE:**

**Science:** Deux grands sujets dans cette thématique: (1) la machinerie interne et l'étude de la zone radiative profonde, (2) la génération du champ magnétique, les caractéristiques de la convection et la compréhension de l'interface zone radiative/convective.

La difficulté expérimentale est importante et réclame le développement de techniques originales, depuis la réception du signal jusqu'à son analyse. Les aspects 'modélisation' apparaissent être primordiaux pour l'interprétation. La modélisation et la compréhension fine de ces processus sont aux franges des capacités de calcul actuelles. L'importance de l'enjeu scientifique est évidente, on discute de la machinerie interne du soleil, avec toutes les questions attenantes à ses cycles et ses variations d'activité. Liens avec asterosismologie.

#### **SAFARI**– *Mission d'opportunité, Midex*

Proposition plus particulièrement tournée vers la sismologie 'locale' et l'imagerie sismique. Etablissement de la cartographie 3D des flux de matière et des hétérogénéités thermiques. Etude particulière de la tacholine (0.7 Rs) base de la zone de convection, région de forts cisaillements en vitesses qui jouerait un rôle essentiel pour le cycle solaire et la régénération du champ magnétique.

Etude des modes de vibration en s'affranchissant des bruits convectifs. S'effectuerait en considérant de possibles cohérences spatiales dans les fluctuations et l'examen à partir de deux angles différents (SDO + Safari). Egalement, mais sans en faire l'objectif primaire, recherche des modes g les plus profonds.

#### **GOLF-NG** – *Micro-satellite CNES.*

Voir la recommandation concernant les micro-satellites. Sondage par modes acoustiques et surtout, de gravité de la région radiative du soleil. L'obtention des modes g est l'objectif principal de GolfNG et l'analyse porterait donc sur les régions centrales du soleil.

### **B- SOLEIL EXTERNE, COURONNE ET VENTS:**

**Science:** Science de l'activité 'visible', à courtes échelles de temps du soleil (d'une étoile...). Analyse des différentes modalités de la perte de masse (les différents vents, les différents types d'activité éruptives: CME, flares...). Lien entre la structuration magnétique du milieu et son évolution. Rôle de la reconnexion, de la turbulence. Accélération et chauffage du milieu. C'est la région source des perturbations du milieu spatial et joue donc un rôle essentiel dans le contexte des relations soleil/terre, de la météo spatiale.

### **LYOT** – *Micro-satellite CNES.*

Analyse en Lyman- $\alpha$  (12 nm) de la couronne. L- $\alpha$  est une raie 'froide' et 'chaude', son intensité est directement liée à la densité donc à la masse de gaz. Elle est relativement indépendante de la température. L'analyse L- $\alpha$  permettrait d'estimer le contenu en masse des structures coronales, paramètre qui est au même titre que le champ magnétique indispensable pour comprendre les instabilité et la dynamique.

C'est à la fois la raie chromosphérique la plus intense mais aussi une raie observée à  $10^7$  K, dans des conditions coronales. Elle permet donc d'observer deux régimes très différents, ce qui est nécessaire pour l'analyse de la zone de transition chromosphère/couronne et donc, comprendre la connexion entre la région basse (chromosphère), froide, dense et très structurée, avec les régions hautes (couronne), très dynamique, chaude et diluée. Cette région de transition est essentielle dans les processus de chauffage et d'accélération. Permettrait l'analyse des processus de formation des CME à l'aide de l'étude de l'évolution en continue des arches coronales. Domaine vierge de la basse couronne, très complémentaire de SDO.

### **ASPICS** – *Vol en Formation*

Observation de la couronne à moins de 1.2 Rs et conception d'un coronographe pour 'descendre' à 1.01 Rs. Un objectif jamais atteint en continue (uniquement lors d'éclipses). Evolution des structures fines de la basse couronne. Reprend les thématiques scientifiques de Lyot avec comme avantage la possibilité d'analyse directe de la zone de transition (à quelques milliers de kilomètres de la surface solaire).

Plus haute résolution spatiale que tout ce qui avait été fait auparavant (Trace, Stereo) avec, surtout, des observations jusqu'à 1.01 Rs (Stereo > 1.3, SDO > 1.3).

Satellite fille: 2 imageurs UV et 1 occulteur à pétale déployable

Satellite mère: 3 coronographe (Visible, L $\alpha$ , HeII ou O VI)

Distance inter-satellite de 94 m à 50 cm près en longitudinal, à qq mm en latéral.

### **SONDE SOLAIRE** - *Mission d'opportunité NASA*

Analyse proche de la couronne solaire: survol du soleil à 4 Rs. Donne la réalité locale, in situ, des processus de nature cinétiques (spectres d'ondes, fonctions de distribution etc...) qui régissent les processus de pertes de masse du soleil. Une priorité des exercices de prospectives passées, la plus haute priorité de la discipline dans les 'road map' NASA. Difficultés techniques évidentes. Recentrage vers des aspects 'science in-situ' qui rend la sonde solaire plus complémentaire de Solar Orbiter que les versions précédentes. La communauté française manifeste un fort intérêt. Aspects technologiques également importants, avec moyens de test (Odeilho).

### **SOLAR ORBITER** - *ESA*

**Analyse proche du vent solaire:** Analyse de l'Héliosphère interne sur une orbite qui s'approche du Soleil à des distances inégalées, avec des phases proches de la corotation aux périhélie, Sortie du plan de l'écliptique, première mesure des champs magnétiques au pôle.

Cette mission est très adaptée à l'étude en continu de l'activité (suivi de l'évolution des structures coronales sur le long terme, en s'affranchissant de la rotation solaire). Instrumentation 'remote sensing' et plasma (ondes/particules) complète. Composition, jusqu'aux espèces lourdes minoritaires, chauffage et accélération du vent, processus éruptifs, physique fine des structures coronales.

### **MIRAGES, Eruption IR – *Micro-satellite CNES***

L'infrarouge n'a jamais été utilisé pour étudier les éruptions solaires. C'est un des moyens de déceler les électrons ultra-relativistes (synchrotron) et d'apporter par comparaison avec les mesures gamma des contraintes sur les taux relatifs d'accélération ions/électrons. Il s'agit d'observer les particules les plus rapides générées lors de processus impulsifs solaires. Des énergies de quelques GeV sont atteintes, sur des temps relativement courts (moins de la seconde). Ces processus d'accélération extrêmes ne sont absolument pas compris.

### **H-alpha, Télescope solaire - *Micro-satellite CNES***

Surveillance solaire continue en H-alpha à des fins de météo spatiale.

### **HELIX – *Midex NASA***

Proposition associant la logique de Stereo (étude in-situ et observations à distance stéréoscopique de la propagation des perturbations coronales) et RHESSI (expérimentation gamma pour l'étude de l'activité éruptive).

### **VIGIEWIND – *Micro-satellite, avec voile solaire.***

Projet de surveillance solaire, utilisant une voile solaire pour rapprocher le point du soleil. Doublement possible du temps de préavis: de 30 mn actuellement au point L1 à un peu plus d'1 heure. Charge utile de type ACE (particules, champ B). Météo Spatiale.

## **C-MAGNETOSPHERE TERRESTRE:**

**Science:** Par excellence, le domaine de la science 'in-situ' de la matière 'chaude' (les plasmas sans collisions). La nouvelle génération de projets s'attaque à l'analyse complète de ces milieux en considérant à la fois à la dimension globale des phénomènes (topologie 3D d'une structure) et la physique locale des processus (quelle microphysique ?). Cela passe par la conception de projets multi-satellites qui permettent l'analyse de la turbulence et de la dynamique du milieu, simultanément aux différentes échelles. La haute résolution temporelle est importante (obtention de fonctions de distribution en une fraction de seconde) pour accéder aux échelles électroniques .

### **RBM – *Micro/Nano satellite spinné ?***

Etude des processus physiques qui contrôlent la dynamique des ceintures de radiations. Accélération, injections et pertes, interactions ondes-particules, variations temporelles dans le but améliorer les modèle dynamique de ces régions.

A rapprocher de la thématique GEOSPACE: besoin d'un satellite en permanence dans les ceintures.

- identification et caractérisation des processus d'accélération
- caractérisation des interactions ondes-particules
- dynamique des ceintures
- effets atmosphériques

Aspect applicatif de la mission (space weather).

**STORMS** – *Constellation magnétosphère interne.*

Lien avec RBM et dans une certaine mesure Résonance. Peu de satellites ont fait des mesures dans ces régions: (EquatorS, AMPTE/CEE et CRRES, tous ayant des durées de vie limitées).

- physique des ceintures et des orages.

L'apport de 'storms' tient dans l'instrumentation d'imagerie neutre (CF Image, Cassini/Mimi).

Pour aller au bout de cette technique (ne pas seulement intégrer le long du champ de vue), il fait des techniques de stéréoscopie, d'où les 3 satellites. Objectif de météo spatiale.

**RESONANCE** – *Mission d'opportunité (avec Russie)*

2 satellites pour l'analyse des processus d'interactions onde/particules se produisant sur une même ligne de force. Processus d'interactions résonantes, études de processus maser, Analyse globale de l'effet des ondes sur l'évacuation du plasma d'un tube de flux.

**IMEDIA** – *Constellation aurorale*

3 satellites pour l'analyse des processus d'accélération, de chauffage et d'émissions radio aurorales. Thématique scientifique qui reprend celle d'Ibiza.

- Origine de la structuration spatiale des régions d'accélération, lien avec les régions de courant parallèle. Analyse des échelles transverses courtes ?
- Origine des champs parallèles accélérateurs ?
- Processus d'accélération et de chauffage associés à la propagation d'ondes d'Alfvén. Processus de filamentation de ces ondes.

Très forte résolution temporelle (10 ms). Phases dans la mission: (1) les uns derrière les autres (500 m à 50 km), (2) en équerre, pour une vision 2D, (3) les uns dessous les autres.

**HERAKLES** – *Constellation magnétosphérique*

Vision post-Cluster à 12 satellites. Projet qui vise l'étude multi-échelle des phénomènes magnétosphériques. Il s'agit de d'analyser et comprendre le comportement non-linéaire d'un milieu naturel complexe, fortement non-homogène. Une difficulté fondamentale apparaît être la prise en compte simultanée de la structure 3D des phénomènes et le détail des processus microscopiques. Mission dont le concept a été proposé au 'Call for Themes' de l'ESA.

**SPOC** – *Micro spinné*

Développement d'un microsatellite spinné qui serait la base des futurs satellites constitutifs des constellations. Lien avec Herakles.

**FUSEES et BALLONS**

vol de fusées sondes – test de certains instruments.

**SENTINELLE** – *Micro-Spinné*

Surveillance de l'environnement. Appui d'expériences multi-satellites et de constellation. Successeur d'ACE. Lien avec SPOC du point de vue du hardware et de la plate forme. Etude du vent solaire proche et de la magnétogaine.

**D – INTERFEROMETRIE RADIO:**

**Esprit** - *Petite expérience embarqué, pour aider l'interférométrie radio 'sol'.*

Etude de la propagation ionosphérique. Transmetteurs embarqués, signaux reçus au sol; analyse de la transmission ionosphérique (réfraction, élargissement angulaire...); corrections de la réception des interféromètres au sol (LOFAR). Sorte d'étoile artificielle 'radio'. Transmetteurs de basses fréquences à placer comme expérience secondaire.

**PARIS** – *Vol en Formation*

Interféromètre spatial basse fréquence (sous 30 Mhz).

- Relations Soleil-Terre. cartographie basse fréquence des émissions solaires.
- Etude des radio-galaxies. Evolution de la composante basse énergie des plasma galactiques.
- Cartographie du milieu interstellaire ionisé. Turbulence à petite échelle en observant les effets de propagation sur les émissions des pulsars. Etude de l'accélération des cosmiques par des chocs résiduels de super-novae.
- Découverte de nouveaux phénomènes...

Projet qui permettrait de concrétiser la RefT faite au LPCE sur le sujet (CoDRIS). Satellites de type Myriade avec des antennes réduites de type Stereo. Avec 2 satellites, pas de cartographie instantanée, on peut cependant faire de la synthèse d'ouverture.

Pas de contrainte forte au niveau du vol en formation, par contre, un lien intersatellite de très haut débit (600 Mbits). L'avancée technique majeure qui rend crédible le projet est la possibilité de traitement direct à bord, qui permet de relaxer la contrainte portant sur le débit de télémesure avec la Terre.

**E- ENVIRONNEMENT TERRESTRE**

**ISIS** – *Vol en formation*

Tomographie des séismes à partir de moyens spatiaux. Analyse fine (1km/1km) de la déformation du front d'onde sismique: variation locale de vitesse de phase et de la vitesse de groupe. Analyse radar pour détecter les variation du TEC. SAR (Radar à Synthèse d'Ouverture) embarqué qui fonctionne sur le principe de la mesure du déphasage dans un aller-retour satellite/sol lié à des fluctuations du TEC.

Concept de base qui est celui du satellite radar. On ajoute 1 ou 2 satellites pour faire de la tomographie 3D de l'ionosphère. Recherche des signaux de courtes périodes (20-50s), plus intenses pour les séismes violents.

Un autre aspect de l'expérience est la réalisation d'un gravimètre ultra-sensible, à partir de 2 satellites considérés comme des masses inertes dont on mesure les variations de distance par interférométrie laser (variations de  $10^{-20} \text{ s}^{-2}$ ). Il s'agit de détecter les modes de gravité associés au noyau liquide de la Terre.

Pas de contrainte forte de positionnement, par contre extrême précision de la distance intersatellite.

**TARANIS** – *micro-satellite CNES*

Etude des Sprites et des Elfes. Couplages impulsifs atmosphère/ionosphère au dessus des cellules orageuses. Ces processus mettent en jeu de très fortes énergies, avec émissions dans tout le spectre, de la radio aux gamma.

- Etude générale de ces processus: distribution géographique, fréquence, influence de facteurs externes (volcanisme, aerosols...)

- Mécanismes à la base de ces phénomènes: champ quasi-statique intense, avalanche d'électrons relativiste. Quel processus d'accélération?
- Déclencheurs de ces phénomènes, lien avec les gerbes cosmiques.
- Couplage vers la magnétosphère.

Charge utile complète: optique, radio, gamma, X, électrons relativistes.

## **F- PLANETOLOGIE**

### **JIMO/JUNO - NASA**

L'avenir de l'exploration de l'environnement des planètes géantes, en particulier Jupiter.

Un domaine où la communauté française déclare un très fort intérêt.

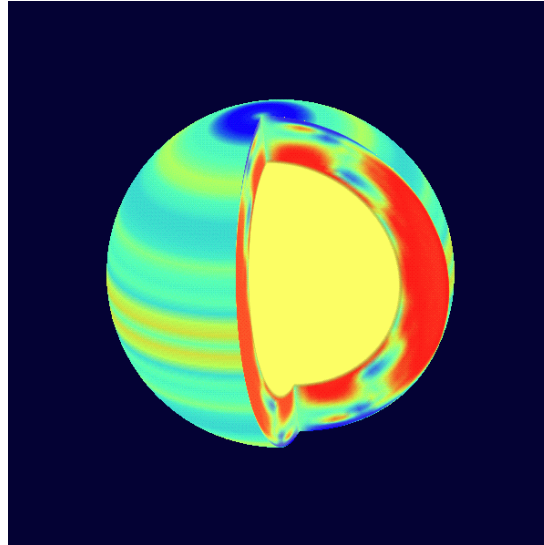


Figure 1 : Vue tri-dimensionnelle des écarts de vitesse dans les couches internes du soleil et à sa surface. Des 'jets' dans les régions polaires, la présence d'une couche de fort cisaillement (tachocline, vers 0.7 Rs), la structuration en latitude de la rotation sont bien apparentes. Ces mesures sont obtenues par les techniques d'héliosismologie et les instruments de SOHO.

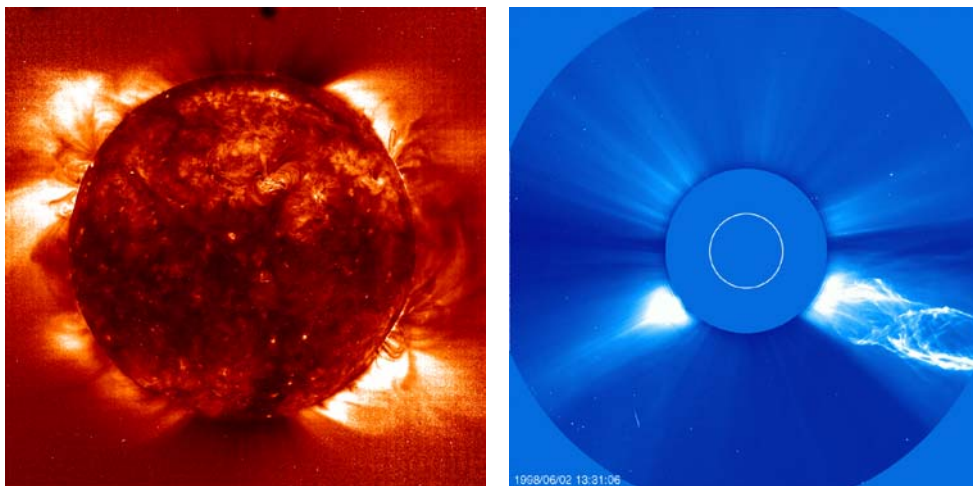


Figure 2 : Images obtenues par les instruments de SOHO montrant la complexité topologique des champs magnétiques coronaux et un exemple d'éjection de masse coronale. Dans ce dernier cas, l'organisation hélicoïdale du champ est très visible.

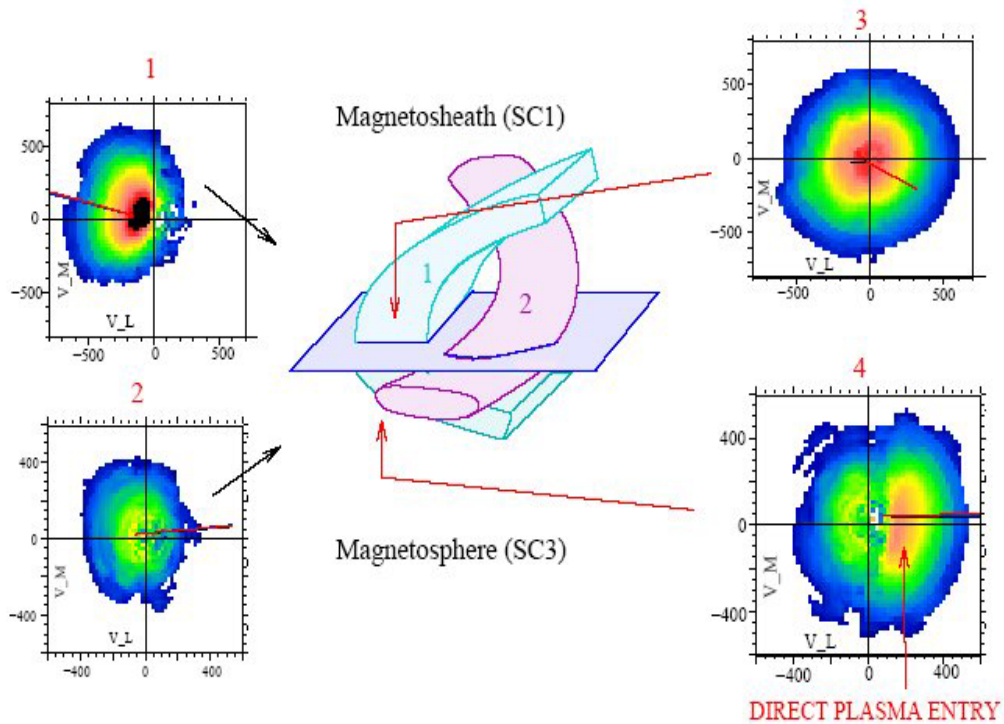


Figure 3 : Exemple de relation ‘micro/macro’ physique étudiées grâce à Cluster. Seule la présence simultanée des 4 satellites de Cluster permet de reconstruire la configuration magnétique ‘entrelacée’, résultant vraisemblablement d’une reconnexion, montrée au centre de la figure. Dans le même temps, les fonctions de distribution des particules sont mesurées (ici les ions) et permettent d’identifier au niveau microscopique les modifications les plus fines de l’état local du plasma . Ici, un très net chauffage (distribution 3 ) et une entrée directe du plasma solaire dans l’environnement terrestre (distribution 4).

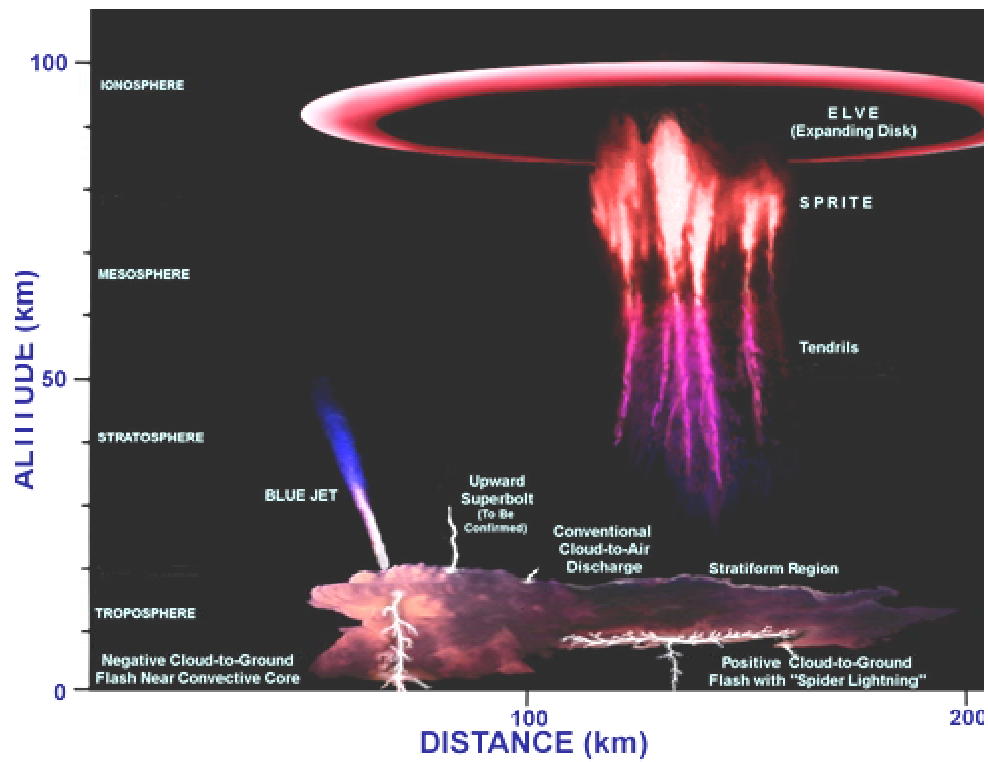


Figure 4: Vue recomposée des phénomènes se développant aux interfaces atmosphère/thermosphère/ionosphère, au dessus des systèmes orageux (sprites, elfves...).