

Étude et exploration de l'Univers (Comité Ceres)

Synthèse

p 10

Système solaire

p 24

Astrophysique

p 34

Soleil, héliosphère, magnétosphère

p 55

Physique fondamentale

p 68

Exo/astrobiologie

p 94

Nébuleuse Ngc 2080, faisant partie du grand nuage de Magellan, observée par le télescope spatial Hubble. La lumière de cette nébuleuse montrée sur cette image est émise par deux éléments, l'hydrogène et l'oxygène. Le rouge et le bleu sont des régions de gaz d'hydrogène chauffé par des étoiles proches. Le vert sur la gauche provient de l'oxygène incandescent.



Rencontre entre deux galaxies NGC 2207 (à gauche) et IC 2163 (à droite) observées par le télescope Hubble.
©Esa/Nasa/STSCL, 1999

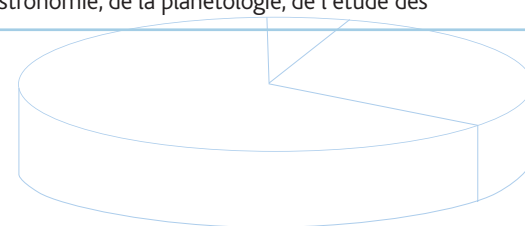
Un champ de recherche étendu, balisé par de grandes questions scientifiques

L'utilisation scientifique de l'espace a été, au sens plein, une véritable révolution scientifique pour l'étude et l'exploration de notre Univers. À partir des années 60, les véhicules spatiaux ont en effet permis :

- > d'explorer *in situ* le milieu spatial lui-même (haute atmosphère, magnétosphère, milieu interplanétaire) ;

- > d'ouvrir l'accès à la totalité du spectre électromagnétique pour l'astronomie ;
- > d'aller étudier " sur place " les objets du système solaire.

Depuis cette époque fondatrice, le champ des applications de l'espace à l'étude et l'exploration de l'Univers s'est continuellement élargi, comme le démontrent l'arrivée de nouvelles communautés et le nombre croissant d'équipes scientifiques concernées par les programmes spatiaux. Au moment où le Cnes conduit un nouvel exercice de programmation spatiale, le paysage des disciplines concernées est très vaste. En plus de l'astronomie, de la planétologie, de l'étude des



* Président du Ceres.

plasmas spatiaux, il faut signaler le développement de deux communautés plus jeunes dans le spatial :

- > la communauté de la **physique fondamentale**, qui ne peut réaliser que dans l'espace ses projets d'étude du temps, de l'espace et de la gravitation et de leur métrologie ;
- > à l'autre extrémité, vers l'étude de la matière complexe, la communauté **exo/astrobiologie**, dont la problématique scientifique cherche à retracer les chemins qui mènent à l'émergence de la vie, sur Terre et ailleurs.

De l'élémentaire au complexe, c'est ce champ de recherche très vaste que les groupes de travail thématiques du Ceres ont exploré pour y identifier les projets spatiaux les plus capables de faire avancer la recherche dans les années à venir. La lecture des rapports détaillés de l'ensemble des groupes révèle, sans le moindre doute, que l'outil spatial est aujourd'hui essentiel pour contribuer à répondre aux questions scientifiques les plus brûlantes que nous pose notre Univers, parmi lesquelles :

- > Quelles sont les relations du temps, de l'espace et de la gravitation aux différentes échelles ?
- > Quelle est la nature de la matière et de

l'énergie noire qui semblent être les composantes dominantes de notre Univers ? (Figure 1)

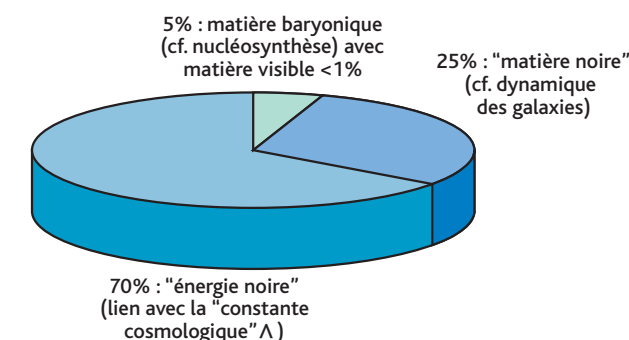


Figure 1 : Distribution de la matière et de l'énergie dans l'Univers.

- > Par quels diagnostics observationnels pouvons-nous arriver à mieux cerner les processus physiques qui ont déterminé la phase très critique de l'inflation ?



Figure 2 : Carte de l'émission en rayons X durs (ou gammas mous) du centre de notre Galaxie, obtenue par la caméra Isgr du satellite Intégral aux énergies de 20 à 60 kilo-électronvolts. L'image Isgr (points lumineux) est superposée à la carte de la répartition du gaz d'hydrogène dans la Galaxie (nébulosité rouge) qui trace le disque galactique. Plus de 90 sources sont visibles sur l'image gamma, représentées en couleurs (du rouge au bleu), selon leur proportion croissante de rayons de haute énergie.

- > Quand et comment se sont formées les galaxies et les grandes structures de l'Univers ?
- > Comment fonctionnent les objets les plus énergétiques de l'Univers, noyaux actifs de galaxies, trous noirs, objets compacts, sursauts gamma ? (Figure 2)
- > Comment se forment étoiles et systèmes planétaires ? (Figures 3 et 4)
- > Quel a été le passé de la planète Mars, comment a-t-elle évolué jusqu'à son état présent ? (Figures 5 et 6)
- > Y a-t-il de la vie dans le système solaire en dehors de la Terre et au-delà ?
- > Comment explorer et élucider la structuration multi-échelles de notre environnement spatial et ses frontières extrêmes avec l'atmosphère solaire (la couronne) et avec le milieu interstellaire (les confins de l'héliosphère) ?
- > Quels processus contrôlent les couplages énergétiques de notre atmosphère

météorologique avec le Soleil et la haute atmosphère ? Ont-ils un effet sur notre climat ?

Nous allons voir que les projets spatiaux prioritaires portés par la communauté scientifique se positionnent sur ces grandes questions.

De nouveaux moyens d'accès à l'espace

La réponse à ces grandes questions passe très souvent par la mise en œuvre de nouveaux moyens d'accès à l'espace ou de nouvelles méthodes d'observation dans l'espace. Ces ruptures technologiques ou méthodologiques qui conditionnent les avancées de demain sont spécifiques à chaque domaine.

- > En **physique fondamentale**, l'étude des relations entre espace, temps et gravitation aux différentes



Figure 3 : Vue d'artiste d'une planète géante et de son étoile HD 209458, située à 150 années lumière de la Terre. ©Nasa-Goddard space flight center (Nasa-GSFC)

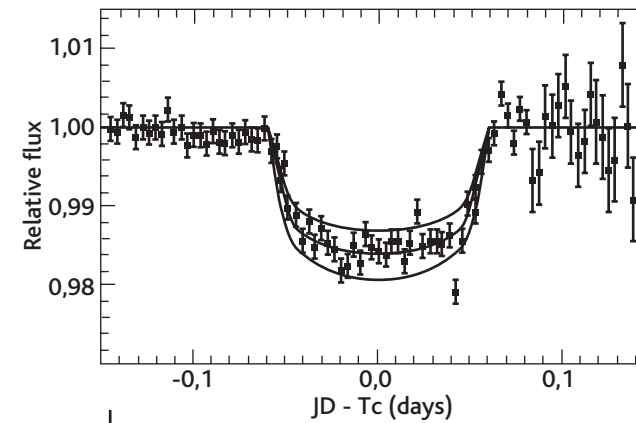


Figure 4 : Le premier transit d'exoplanète observé par photométrie en novembre 1999 à l'Observatoire des Canaries par H. Deeg et al.

échelles cherche à mettre en évidence de nouvelles interactions fondamentales, à préciser les limites du domaine d'applicabilité de la relativité générale, enfin, à détecter directement dans l'espace les ondes gravitationnelles. Elle est conditionnée par le développement, la qualification et la mise en œuvre d'un ensemble métrologique alliant horloges de haute précision, télémètres, senseurs inertiels qui se situent tous à la frontière du savoir-faire technologique actuel.

- > En **astronomie**, on cherche à gagner en résolution angulaire dans tous les domaines spectraux, pour observer et résoudre des objets de plus en plus fins. Dans les domaines optique, infrarouge, radio, cela passe par l'utilisation de collecteurs multi pupillaires dont on puisse faire évoluer et contrôler la configuration. Dans les domaines des plus hautes énergies, X et gamma, il faut réaliser de grandes distances focales. Dans l'un ou l'autre cas, la solution consiste à s'affranchir de la contrainte introduite par l'emport de l'ensemble du système d'observation sur une plateforme unique, et à faire porter les différents collecteurs et une table de recombinaison interférométrique, ou le collecteur et le foyer, par des plateformes spatiales autonomes volant en formation.
- > Dans le domaine de **l'exploration planétaire**, les avancées méthodologiques portent à la fois sur les véhicules et sur l'instrumentation, avec une logique commune : mettre en œuvre des mesures *in situ* à la surface des corps planétaires, ou dans leurs atmosphères, et être capable à terme de prélever et rapporter sur Terre des échantillons.

- > Au niveau des **véhicules**, cela suppose :
 - la capacité de déposer des **laboratoires** scientifiques fixes (stations de mesure) ou mobiles (*rovers*) à la surface des planètes (Lune, Mars, Europe, etc.) ou des petits corps (astéroïdes, noyaux cométaires),
 - la maîtrise des **techniques de rentrée** de sondes atmosphériques (pour Mars, Vénus et les planètes géantes),
 - celle des **véhicules de retour** vers la Terre depuis les surfaces planétaires, afin d'atteindre l'objectif plus lointain d'un retour d'échantillon.

Le développement de capacités européennes dans ces domaines constitue l'objectif, particulièrement ambitieux, du programme d'exploration de l'Esa, que nous souhaitons que le Cnes soutienne vigoureusement.

- > Au niveau des **opérations scientifiques**, cela suppose un effort soutenu de développement de l'instrumentation *in situ* pour les géosciences, les sciences des enveloppes fluides et l'exobiologie. Cet effort, indispensable pour rester sur le front actif de la recherche dans les deux décennies à venir, relève d'une action concertée du Cnes et de ses partenaires dans le domaine de la recherche (Cnes et laboratoires).
- > Enfin, **l'étude de l'environnement spatial de la Terre et des planètes**, de ses interactions avec l'activité et l'atmosphère solaire et avec le milieu interstellaire, des relations Soleil-Terre, appelle elle aussi aujourd'hui de nouvelles avancées technologiques ou méthodologiques.
 - Pour mieux comprendre le comportement dynamique très complexe des plasmas spatiaux, qui se caractérise par l'apparition de structures sur une grande diversité d'échelles spatiales et temporelles, il faut pouvoir accéder à ces différentes échelles spatiales en les séparant sans ambiguïté des variations temporelles. Cela passera par la mise en œuvre de **vols en constellation** de plateformes légères, embarquant des instrumentations aussi identiques que possible.
 - Pour explorer les frontières ultimes de ce plasma spatial, il faut se donner les moyens d'accéder à ces frontières et d'y faire des mesures : véhicules et instrumentation capables d'explorer *in situ* la couronne solaire, ou d'atteindre en un temps raisonnable les frontières de l'héliosphère et le

milieu interstellaire lui-même. Les trajectoires de ces "explorateurs de frontières" de l'héliosphère, partant à destination de régions très lointaines du champ de gravité solaire, ont également un grand intérêt pour vérifier les lois de la gravitation à des échelles mal explorées mais que l'effet Pioneer a rendu particulièrement intéressantes.

Un large spectre de tailles de projets

L'étude scientifique de l'Univers est un domaine qui progresse avant tout par les avancées dans les capacités d'observation. Ce sont ces avancées, de nature essentiellement technologique, qui permettront demain de répondre aux questions scientifiques dont la résolution est encore hors de portée aujourd'hui. Pour maintenir la dynamique de ce cercle vertueux dans lequel avancées technologiques, solution de problèmes scientifiques et apparition de nouvelles questions se confortent mutuellement, il faut à la fois :

- > des **programmes spatiaux de faible coût** et à cycle de développement court, pour concevoir et tester en vol de nouvelles méthodes, de nouveaux capteurs, et pouvoir réaliser rapidement une mission scientifique très ciblée sur un enjeu scientifique précis et limité ;
- > des **programmes spatiaux très ambitieux**, de coût d'investissement élevé et visant, sur le moyen et long terme, à traiter un grand problème scientifique.

Cette double exigence impose de disposer d'un large spectre de tailles de projets, depuis les "petits" projets à cycle court réalisables dans le cadre national jusqu'aux grands défis internationaux.

La communauté scientifique spatiale française est, de ce point de vue, dans une position favorable, qui permet de construire naturellement cette **nécessaire co-existence de projets de petite et grande taille**. Si ces derniers relèvent de l'échelon européen auquel la France a accès grâce à l'Esa, la programmation scientifique de l'Esa peut être convenablement articulée, dans une conception claire de la "subsidiarité scientifique", avec l'échelon national qui, grâce au Cnes, nous donne accès à un large spectre de tailles de projets.

C'est cette stratégie de recherche d'une utilisation optimale de l'ensemble des tailles de projets qui nous a guidés dans notre réflexion. Le dernier paragraphe proposera une programmation qui vise à inscrire nos projets prioritaires dans l'ensemble des cadres programmatiques disponibles, en utilisant au mieux leurs complémentarités.

Une vision européenne de la science spatiale : trois acteurs complémentaires

Les grands défis scientifiques à relever dans les années à venir sont majoritairement de dimension européenne ou mondiale, par les volumes d'investissement nécessaires, la complexité des missions et la diversité des compétences à mettre en jeu. **L'Europe est donc pour nous l'échelle d'organisation pertinente** à condition de bien l'articuler avec les agences nationales européennes, à commencer par le Cnes, et les autres grands acteurs du spatial.

Avec l'affirmation récente de la volonté de l'Union européenne de devenir un acteur de la politique spatiale, cette déclinaison européenne de notre stratégie devra, à l'avenir, s'appuyer sur une répartition claire des rôles de ces trois acteurs-clés que sont le **Cnes**, l'**Esa**, et enfin l'**Union européenne**. Voici comment nous comprenons aujourd'hui cette répartition des rôles.

- > **Le "socle" du programme scientifique spatial européen est l'Agence spatiale européenne (Esa)** et de ce fait le socle du programme national est la participation aux programmes de l'Esa :
- le **programme scientifique obligatoire** et son prolongement en cours de définition, "*Cosmic vision 2015-2025*", financé sur une base récurrente, permet de relever les défis scientifiques les plus ambitieux. Il réalise ces missions ambitieuses, soit dans le strict cadre européen, soit en coopération avec les autres grandes agences spatiales du monde ;
- le **futur programme d'exploration**, ou programme Aurora, répond à des objectifs de nature d'abord technologique, mais permet d'offrir un accès à l'espace pour des missions scientifiques d'étude

in situ de la surface des planètes et des petits corps. Il complète la palette du programme obligatoire, dont les seules ressources ne permettraient pas l'effort technologique nécessaire et l'ouverture à ces nouvelles disciplines spatiales au niveau souhaitable.

En plus de la conduite de ses propres missions, ainsi que de la participation européenne à de très grands projets internationaux, l'Esa est en position idéale pour assurer une nécessaire concertation entre ses États-membres sur leurs programmes spatiaux nationaux et faciliter l'émergence d'une indispensable cohérence d'ensemble des programmes européens (Esa et programmes nationaux).

- > **Le programme national de missions et d'activités scientifiques du Cnes** permet de compléter la programmation de l'Esa par un spectre large de missions ou de contributions instrumentales. Il offre en effet les possibilités suivantes :
- **réaliser et faire voler des instruments français** ou à participation française sur des missions d'autres agences ("missions d'opportunité") lorsque leurs objectifs scientifiques permettent de traiter des objectifs uniques et ambitieux ;
- **réaliser une mission de démonstration** faisant appel à une capacité nouvelle telle que le vol en formation, dans l'un des créneaux scientifiques nécessitant la mise en œuvre de cette capacité ;
- étudier de **nouvelles missions** de taille moyenne, éventuellement en collaboration bilatérale, sur des sujets non couverts par l'Esa ou les autres grandes agences ;
- concevoir et réaliser, dans des cycles de réalisation courts, des **missions de microsattellites** dans des créneaux scientifiques et/ou techniques innovants.

En plus de la réalisation de missions et d'instruments, le Cnes intervient en amont et en aval des missions spatiales :

- en **amont**, il définit et finance un programme de R&T préparatoire à ces missions et réalise les études de phases O/A nécessaires ;
- en **aval**, il répond aux besoins d'analyse et d'exploitation scientifique des données en développant ou finançant les outils nécessaires et en réalisant certains des traitements.

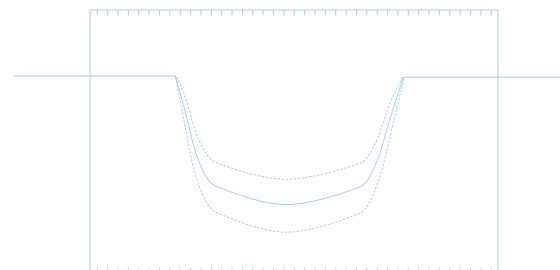
L'ensemble de ces tâches, qui seront développées plus loin (p. 15), est conçu et réalisé en partenariat avec les

autres organismes concernés (pour le Ceres, essentiellement le CNRS/Insu, le CEA et l'Onera) et en concertation avec les laboratoires.

- > **La politique spatiale de l'Union européenne**, et ses instruments, sont en cours de définition, et la communauté française a contribué à ce travail de définition dans le cadre de la préparation du 7^e Programme-cadre de recherche et développement (PCRD). Les principales propositions faites dans ce contexte sont en cohérence avec les grands axes de la politique de R&D de l'Union dans le respect du principe de subsidiarité :
- **mettre en place à l'échelle européenne un dispositif qui permette de valoriser les grands investissements européens en sciences spatiales** : mettre en réseau les compétences à travers l'Europe, stimuler l'excellence scientifique par un soutien direct aux meilleurs projets scientifiques utilisant ces grands investissements, développer et pérenniser des infrastructures d'accès aux données spatiales et sol et des systèmes évolués d'accès à l'information et de traitement (observatoires virtuels), contribuer au développement et au maintien d'un réseau européen de moyens d'essais pour l'instrumentation scientifique spatiale ;
- **soutenir le développement des bases technologiques** des sciences spatiales et de l'exploration du système solaire dans les domaines les plus critiques (énergie et propulsion, robotique et systèmes de bord intelligents, nouveaux détecteurs pour l'astronomie, nouveaux capteurs pour l'étude *in situ* des surfaces planétaires, etc.) ;
- **mettre les sciences spatiales au service de la formation scientifique et technique supérieure** par la création d'un réseau de formation dans ce domaine, et associer le citoyen européen aux succès du programme spatial européen en renforçant les moyens de diffusion de l'information scientifique et technique.

Construire un programme scientifique pluriannuel

Le Ceres a réalisé une synthèse critique et sélective des propositions de ses groupes de travail thématiques pour proposer au Cnes la mise en place d'un programme scientifique ambitieux sur une base pluriannuelle.



Le " socle " de ce programme est une optimisation de la participation française aux programmes de l'Esa : programme scientifique obligatoire et programme d'exploration. Cette composante européenne de la programmation du Cnes est la **priorité zéro** du Ceres. Elle se décline selon les différents compartiments du programme à long terme de l'Esa :

- > le **programme scientifique obligatoire de l'Esa**, défini jusqu'en 2015, qui appelle à une forte mobilisation française pour participer au meilleur niveau aux missions envisagées : Vénus-Express, Planck-Surveyor et Herschel, JWST, Gaia, Bepi-Colombo, Lisa et son précurseur Lisa-Pathfinder, Solar Orbiter.
- > le **prolongement de ce programme, " Cosmic vision 2015-2025 "**, dont la définition est en cours avec de nombreuses contributions françaises au niveau des propositions. Le Ceres suggère quelques lignes directrices pour ce programme : réaliser au plus tôt les missions Darwin et Xeus, faire mûrir des projets de constellations magnétosphériques et de sonde solaire, programmer les missions post-Microscope pour la physique fondamentale (test à plus grande précision du principe d'équivalence, test à grande distance de la loi de Newton), définir une nouvelle missions ambitieuse vers le système solaire externe après Cassini-Huygens.
- > Construire une **stratégie européenne pour l'étude de Mars** dans le cadre du programme d'exploration, en mettant l'accent sur le développement de ses bases technologiques.

Le Ceres réaffirme aussi le rôle essentiel du programme national de missions et d'activités scientifiques à côté de notre contribution au programme européen. Ce programme national, qui constitue notre **priorité 1**, devrait se décliner en quatre composantes :

- > la **réalisation d'une mission de démonstration du vol en formation**. Le Ceres soutient très fortement ce projet à double retombée, scientifique et technologique, en proposant plusieurs candidats de très grand intérêt : Aspics, Max, Pégase et Simbol-X, qui devront être mis en compétition après réalisation des études d'avant-projet nécessaires.
- > la **poursuite du programme de petites missions et de microsatellites**, dont le Ceres souligne le fort retour scientifique par rapport au volume d'investissement qu'il représente. Après la poursuite des projets engagés (Corot, Microscope, Pharo) et la décision de dégel de Picard, que le Ceres recommande, il s'agit d'engager un nouveau

cycle d'études de missions capable de fournir des candidats du meilleur niveau pour une sélection tous les deux ans.

- > une **participation nationale instrumentale à un niveau significatif pour des missions d'autres agences correspondant pour nous à une forte priorité scientifique**. La priorité très forte pour l'étude scientifique de Mars, que nous réaffirmons à l'occasion de ce nouvel exercice de prospective, désigne tout naturellement une participation française à la mission Mars science laboratory 2009 de la Nasa et, éventuellement, aux missions suivantes du même programme, comme notre priorité dans ce cadre.
- > l'**étude de nouvelles missions moyennes de grand intérêt scientifique dans le cadre national, dans la perspective de collaborations bilatérales**. Le Ceres a identifié plusieurs très

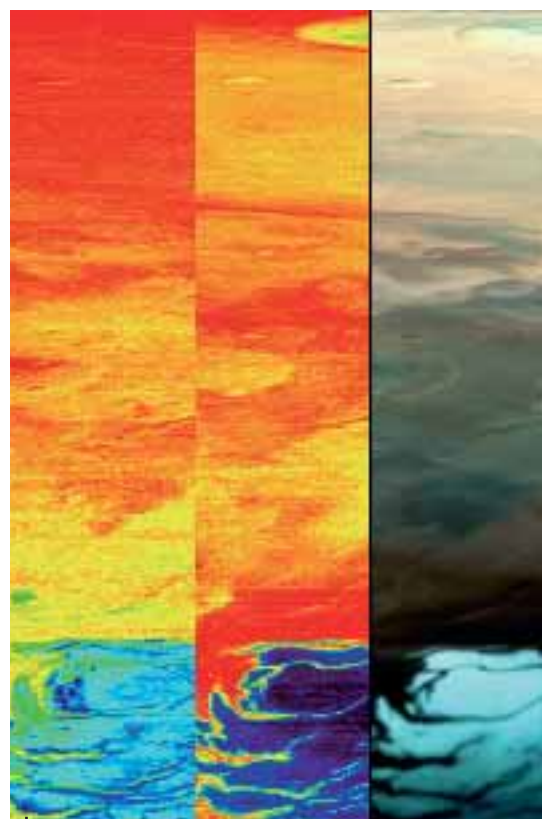


Figure 5 : La calotte polaire sud de Mars vue par l'instrument Oméga de Mars Express le 18 janvier 2004 dans les trois bandes spectrales. La bande de droite est l'image visible, celle du milieu montre la glace de CO₂ et celle de gauche la glace d'eau. ©Esa

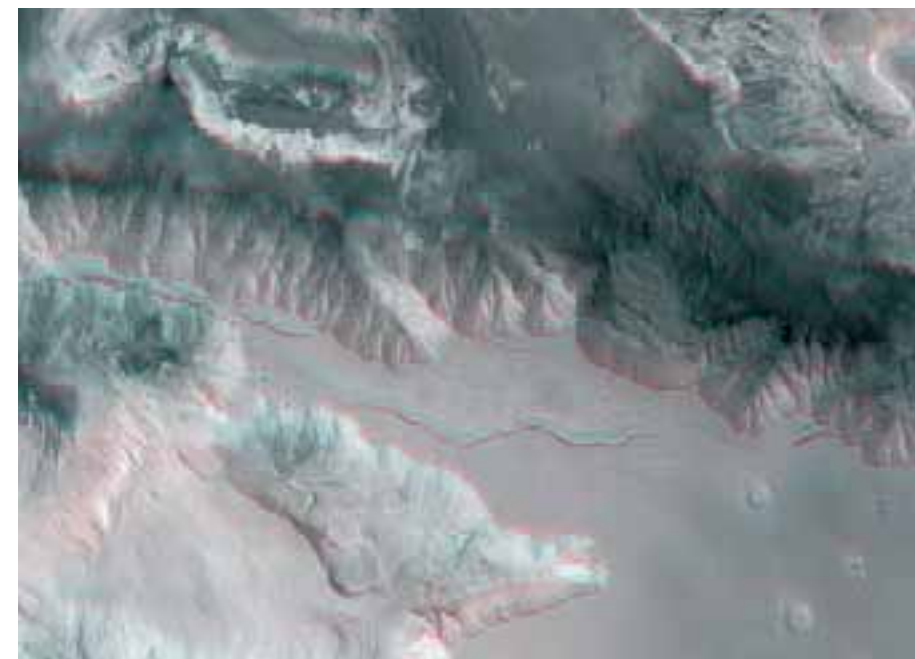


Figure 6 : Candor Chasma en 3D. Cette image de Mars a été obtenue le 2 mai 2004 grâce à l'instrument haute résolution HRSC de Mars Express. ©Esa/DLR/G. Neukum

fortes priorités pour ce type d'initiative : en cosmologie, le projet de mission Sampan, pour la mesure de la polarisation du rayonnement fossile cosmologique à la suite de Planck-Surveyor, et le projet Dune, qui a pour objectif la réalisation d'un imageur à grand champ pour l'étude de la matière noire à partir de la détection et de l'analyse des émissions des supernovae de type 1a. En planétologie, le Cnes devra poursuivre ou reprendre ses initiatives pour réaliser une mission d'atterrisseur martien dédié à la science *in situ* (géophysique et exobiologie), et nous lui recommandons également d'étudier une mission de rendez-vous avec un astéroïde géocroiseur, dont la réalisation semble pouvoir intéresser plusieurs de nos partenaires étrangers.

Maîtriser l'amont et l'aval des missions spatiales

Dans le contexte de subsidiarité évoqué plus haut, c'est un domaine où le rôle de l'agence nationale est essentiel. C'est aussi un domaine où un soutien est attendu en priorité de l'Union européenne dans le cadre du 7^e PCRD et de ses successeurs.

Un programme vigoureux de R&T Cnes

Le besoin de R&T concerne à la fois les technologies véhicules et les technologies instrumentales. En particulier, sur ce dernier point, l'effort de R&T consenti par le Cnes conditionne étroitement le niveau de maturité, et donc la crédibilité, des instruments français proposés en réponse aux appels d'offres de l'Esa et de la Nasa. Cet effort sur les technologies critiques doit être complété par un support du Cnes aux analyses de missions (phase 0).

Parmi les domaines d'intervention prioritaires, nous avons retenu les sujets suivants :

- > (I) **nouveaux détecteurs** pour les différentes fenêtres spectrales de l'astronomie ;
- > (II) **soutien au développement de l'instrumentation** adaptée à l'exploration *in situ* des surfaces planétaires (miniaturisation, autonomie, robotique) et à des moyens d'analyse sur Terre en laboratoire des échantillons de matériaux collectés sur ces surfaces ;
- > (III) technologies des **nouvelles méthodes d'observation de l'Univers** et de ses objets : technologies du vol en formation et de l'autonomie satellitaire, systèmes interférométriques spatiaux, mesure et contrôle

du positionnement relatif précis, mesure et transfert ultra précis du temps, etc. ;

- > (IV) **sources d'énergie et techniques de propulsion avancées pour l'exploration planétaire.** La maîtrise par l'Europe de la technologie nucléaire pour la fourniture d'énergie est notamment indispensable. La recherche de nouvelles voies concernant la propulsion interplanétaire devra être poursuivie.

Certains de ces domaines (I et II) concernent spécifiquement l'instrumentation scientifique embarquée et les laboratoires doivent être des acteurs majeurs du programme de R&T associé.

D'autres (III) ont pour objet des technologies bord d'usage générique qui seront incorporées dans de

futurs systèmes spatiaux opérationnels. D'autres (IV), enfin, supposent une volonté au niveau de l'Union européenne et le futur programme spatial européen semble être le cadre naturel de leur développement, que nous estimons indispensable.

La réalisation de l'instrumentation pour les missions scientifiques doit s'appuyer sur **un ensemble complet et cohérent de moyens de test et d'intégration spatiaux**, qui constitue au même titre que les bases de lancement une infrastructure spatiale indispensable à l'Europe. Le 7^e PCRD devra pouvoir intervenir à ce titre pour garantir l'accès de tous les utilisateurs à ce parc et soutenir son évolution technique et sa jouvence.

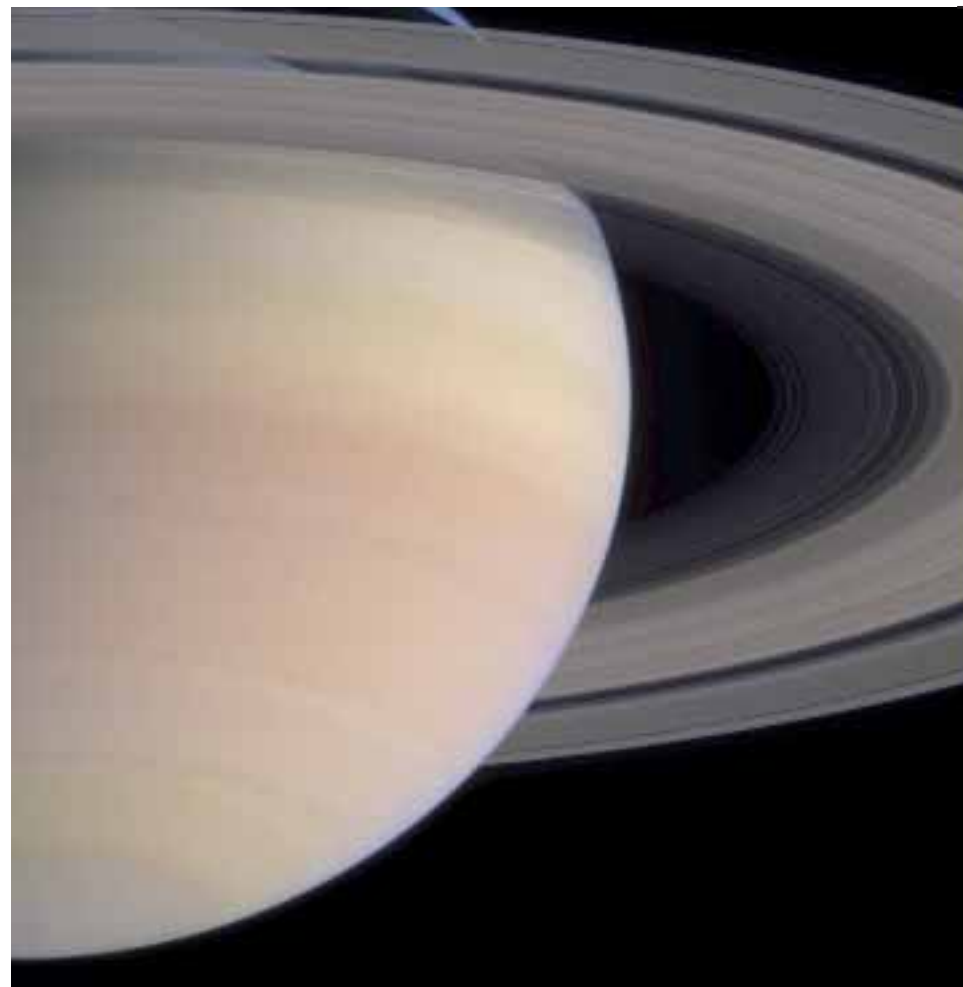


Figure 7 : Saturne et ses anneaux vus par Cassini. Cette image a été acquise le 29 octobre 2004 par l'orbiteur situé à environ 940 000 kilomètres de la planète aux anneaux. ©Nasa/JPL/Space Science Institute

Bien dimensionner les moyens de l'analyse des données

Le support à la communauté scientifique pour l'exploitation optimale des données spatiales est une recommandation forte du Ceres.

Cela concerne d'abord la mise en œuvre du segment sol scientifique des missions considéré comme partie intégrante de ces missions mais aussi l'organisation de moyens de traitement, de distribution et d'archivage à long terme et la mise en place de **pôles thématiques**. On connaît le Centre des données astronomiques de Strasbourg, le Centre des données de physique des plasmas, le centre Soho-Medoc. L'arrivée des données de Cassini-Huygens (Figure 7), de Mars Express et de Vénus-Express, rend nécessaire l'existence de moyens d'accès aux données planétaires. L'architecture de ces pôles peut être différente selon la spécificité des missions¹, le regroupement des moyens peut être réel (centre physique) ou virtuel (portail et protocoles), mais ces pôles doivent être dès l'origine pensés dans une perspective européenne. C'est là qu'un soutien est attendu en priorité de l'Union européenne pour la constitution et la maintenance de réseaux européens fournissant un accès convivial et transparent pour l'utilisateur à l'ensemble des données produites par les grandes infrastructures de recherche européennes, sol et spatiales (notion d'"observatoire virtuel"). L'appui du Cnes pour la mise en place de ces infrastructures est souhaité et le Cnes pourrait être, en partenariat avec les laboratoires français, un acteur majeur de la composante française.

Ce rôle du Cnes doit être complété par la poursuite de ses participations aux programmes nationaux et aux Groupes de Recherche du CNRS.

Une esquisse de programmation

Sur la base de l'analyse de l'importance et de l'intérêt des enjeux scientifiques, le Ceres recommande le maintien au cours des années à venir de l'effort consacré par le Cnes aux activités du domaine de l'étude et l'exploration de l'Univers. Ceci inclut d'une part le **maintien du niveau de ressources du programme scientifique obligatoire de l'Esa**,

en prolongeant au-delà de 2006 les chiffres actuels (qui prévoient une compensation de l'inflation au niveau de 2,5 % par an) et, d'autre part, le **maintien de la participation instrumentale française au niveau élevé** (de l'ordre de 30 %) qu'elle a connu jusqu'à présent et que permet le partenariat privilégié entre le Cnes, agence spatiale française, et la communauté scientifique nationale. Il recommande également une participation significative au programme d'exploration Aurora, tant en termes de contribution financière que d'instrumentation, dans la mesure où la priorité de ce programme, du moins à court et moyen terme, est donnée aux missions automatiques d'exploration *in situ* de Mars, avec en perspective la mise en œuvre d'un programme de retour d'échantillons.

Soulignons que la priorité donnée par la Nasa à l'exploration, dans la perspective de missions habitées vers la Lune et Mars, va probablement entraîner une réduction de l'effort américain dans certains secteurs de la recherche scientifique spatiale tels que la cosmologie, où le programme *Beyond Einstein* de la Nasa est en train de prendre du retard, les planètes extrasolaires, pour lesquelles les Européens sont en pointe malgré une concurrence acharnée, les petits corps et les planètes géantes du système solaire, la physique fondamentale. Il y a là pour les Européens une opportunité à saisir, s'ils savent utiliser leurs ressources.

À très court terme (fin 2004), la décision doit être prise de la participation instrumentale des laboratoires français à la mission **Bepi-Colombo** de l'Esa, ainsi que d'une contribution, modeste du point de vue budgétaire mais qualitativement significative, à la charge utile technologique de la mission préparatoire **Lisa-Pathfinder**. Ces activités d'accompagnement du programme scientifique obligatoire constituent, comme on l'a dit plus haut, le cœur du programme.

Le Ceres recommande également une participation visible de la France à la mission **MSL-09** de la Nasa qui est la seule opportunité à court terme pour les planétologues français de participer à l'exploration de Mars, ce qui demeure leur objectif prioritaire. Compte tenu de la simultanéité des calendriers de sélection de Bepi-Colombo et MSL-09, le Ceres recommande pour ce couple de missions une enveloppe financière qui globalement ne soit pas inférieure à ce qu'était l'engagement français sur Rosetta, la précédente grande mission planétaire (Figure 8).

1- Par exemple, les missions planétaires regroupent en général une collection d'instruments spécialisés de type "PI", contrairement aux missions d'astronomie construites autour d'un nombre réduit d'instruments focaux dont le temps d'utilisation est ouvert sur appel d'offres.



Figure 8 :
Philae, l'atterrisseur
de la mission Rosetta,
doit se poser sur la
comète Churyumov-
Gerasimenko en 2014.
© Esa

Enfin, toujours sur le très court terme, la confirmation du projet de microsatellite **Picard** en vue d'un lancement début 2008 compatible avec la remontée du cycle solaire est également soutenue par le Ceres.

C'est en 2005/2006 que devra être approuvé l'engagement de la participation à l'instrumentation scientifique de **Solar Orbiter** et au segment sol de **Gaia**. Concernant ce dernier projet, une implication forte des équipes du Cnes sera nécessaire, à l'instar de ce qui s'était passé naguère pour le traitement des données de **Hipparcos**.

À moyen terme, la mission **Lisa**, en mettant en évidence de façon directe les ondes gravitationnelles, ouvrira une nouvelle frontière en astrophysique et en cosmologie et une participation importante à sa charge utile est recommandée.

Quatre projets de vol en formation ont été retenus : **Aspics**, **Simbol-X**, **Max** et **Pégase**. Le Ceres recommande que des études de phase 0 soient menées en 2005 pour ces quatre projets, afin de les amener à un même niveau de maturité permettant d'en choisir deux à l'automne 2005 qui passeraient en phase A, l'un d'eux étant finalement sélectionné fin 2006 pour passer en phase B en 2007 en vue d'un lancement dans la période 2011-2012.

L'ouverture de ces projets à des partenaires européens serait d'autant plus bienvenue que deux d'entre eux

préparent directement de futures missions "pierres angulaires" de l'Esa : **Xeus** pour Simbol-X et **Darwin** pour Pégase.

Parmi les autres projets recommandés pour des activités d'avant-projet, certains seront réalisés dans un contexte national ou bilatéral, et on peut penser que d'autres seront repris et poursuivis dans le cadre du programme scientifique obligatoire de l'Esa.

Deux projets de cosmologie, **Dune** (recherche de la matière noire) et **Sampan** (polarisation du fond cosmologique - Figure 9), et une mission de rendez-vous avec un astéroïde géocroiseur ont été retenus. Les thèmes scientifiques portés par ces projets figurent également dans les sorties de l'exercice de prospective de l'Esa "Cosmic vision 2015-2025" et les activités d'avant-projet (phases 0/A) permettront de les préparer aux sélections futures de l'Esa, à l'instar de Planck-Surveyor, qui a bénéficié de la petite mission Samba étudiée par le Cnes. Des activités de phase 0 sont recommandées en 2005 pour ces trois projets. En parallèle, une mission de **réseau géophysique martien** demeure une priorité scientifique après l'arrêt du projet NetLander. Compte-tenu de la maturité de ce projet en raison des travaux intenses de la période 1999-2002, des activités de niveau phase A pourraient être effectuées en 2005-2006 dans un nouveau contexte coopératif à définir. La réalisation du modèle de vol de l'horloge atomique **Pharao** est une étape importante sur le chemin de la

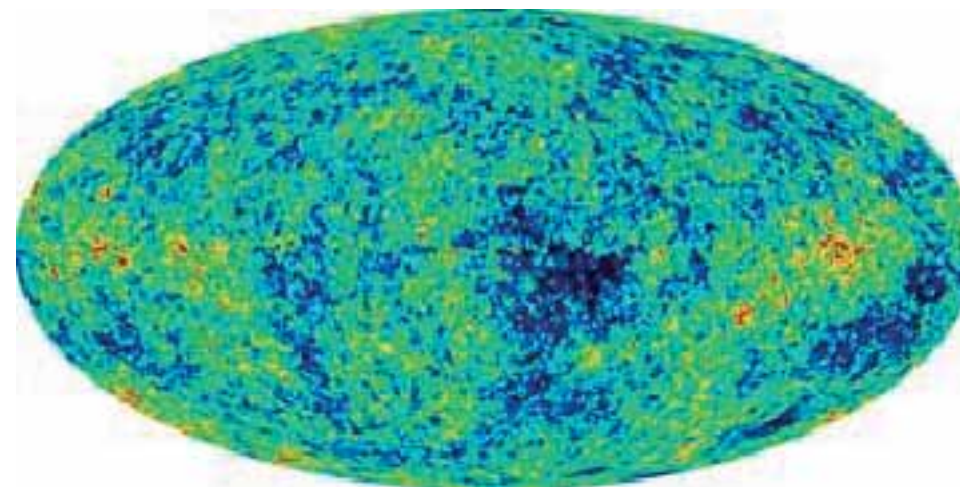


Figure 9 : Distribution des anisotropies du fond cosmologique observée par le satellite WMAP de la Nasa.
© Nasa

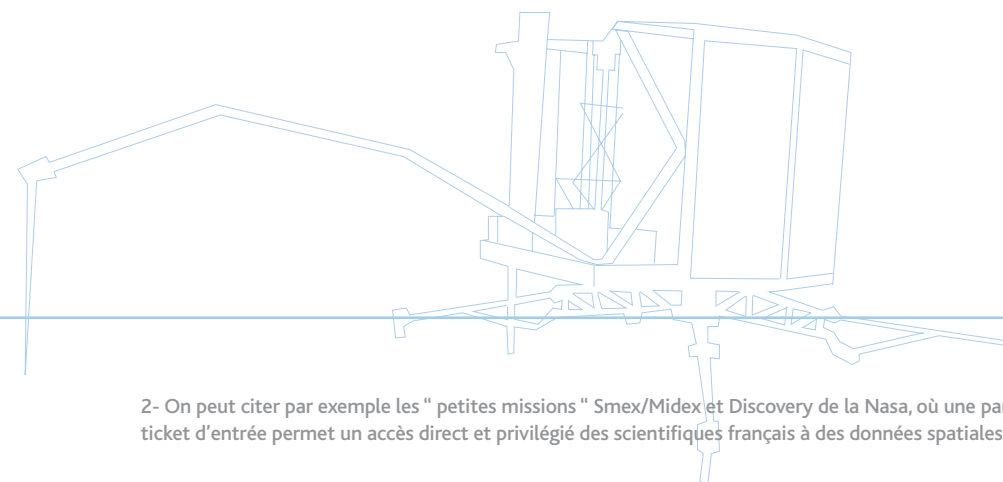
réalisation de nouveaux dispositifs métrologiques utilisant les atomes froids. Il importe donc à court terme de mener à bien l'assemblage et le test du modèle d'ingénierie afin de disposer de tous les éléments permettant de prendre une décision sur la poursuite du projet.

En résumé, fin 2006, deux au moins des projets cités pourraient être confirmés pour réalisation.

Un certain nombre des projets proposés au Cnes utilisent les microsatellites de la filière Myriade. Le Ceres recommande que des activités de phase A soient conduites en 2005-2006 sur les projets **Taranis** et **Eclairs**, et que des activités de phase 0 soient menées sur **Lyot**, **Golf-NG**, **Ice**, en compétition avec d'autres qui pourraient survenir. Concernant **T2L2**, la phase B de l'instrument étant achevée, une opportunité d'emport est à rechercher, soit dans le cadre de Myriade, soit dans un nouveau contexte coopératif à définir.

Enfin, le soutien du Cnes à la participation d'équipes scientifiques françaises à des missions d'opportunités non identifiées aujourd'hui, dans le cadre de coopérations bi ou multilatérales en dehors de l'Esa, qu'il s'agisse des États-Unis, sur l'exemple de MSL-09, ou d'autres agences internationales (Russie, Chine, etc.) doit être maintenu. Ces opportunités de taille très variable², en complétant les missions du cadre Esa, renforcent la visibilité de la communauté scientifique française et confortent sa place dans l'arène internationale.

Cette stratégie programmatique est résumée dans le tableau page suivante.

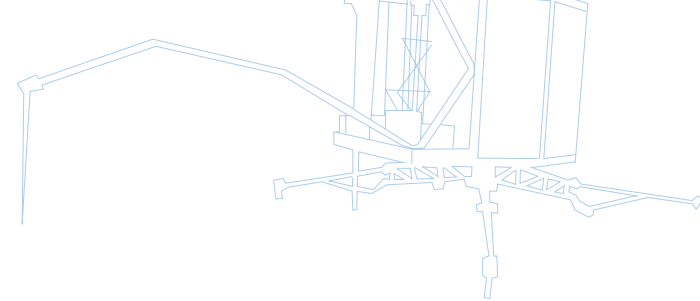


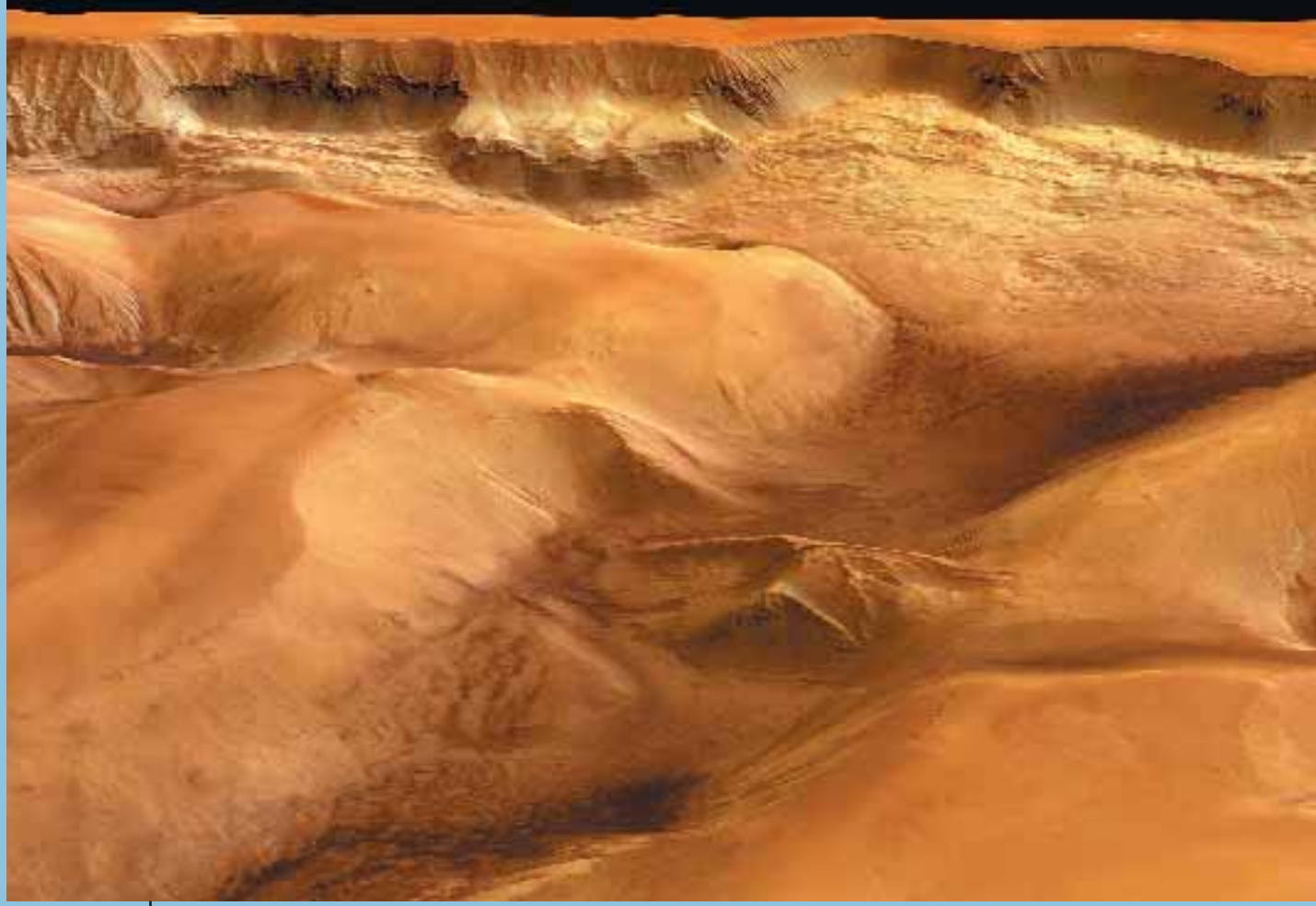
2- On peut citer par exemple les "petites missions" Smex/Midex et Discovery de la Nasa, où une participation modeste comme ticket d'entrée permet un accès direct et privilégié des scientifiques français à des données spatiales.

Stratégie de programmation court et moyen terme en étude et exploration de l'Univers

	2004	2005	2006		2007	2008	2009	2010	2011	2012
Instrumentation missions Esa Missions Horizon 2000 puis Cosmic vision										
		Venus Express			Lisa-Pathfinder, Planck-Surveyor, Herschel				JWST	Gaia, Lisa, Bepi-Colombo
Instrumentation missions d'opportunité Nasa (Mars, Discovery, etc.), Japon, Inde, Chine		1	2							
Mission vol en formation										
		4 phases 0 1	2 phases A 2		1 phase B		phase C/D			tir ^
		Aspics, Max, Pégase, Simbol-X								
Mission microsatellite										
		2 phases A 1	1 phase B		phase C/D		tir ^			
		Taranis, Eclairs			2 phases A 1	1 phase B	phase C/D		tir ^	
Projet en coopération bilatérale et/ou (décision mi 2005 selon résultat Aurora)										
Programme Aurora Esa										
		3 phases 0 1	2 phases A 2		1 phase B	phase C/D				tir ^
		géocroiseur, Dune, Sampan								
		phases A 1	phase B		phase C/D				tir ^	
		atterrisseur martien à stations fixes								
Points de décision Ceres axes participations missions d'opportunité missions vol en formation passant en phase A missions microsatellite passant en phase B/C/D missions moyennes passant en phase A		1 1 1 1								
axes participations missions d'opportunité mission vol en formation passant en phase B/C/D missions moyennes passant en phase B/C/D			2 2 2							

- Ressources faibles
- Ressources réduites
- Ressources moyennes
- Ressources importantes





La partie nord de Valles Marineris vue par l'instrument à haute résolution embarqué sur la sonde Mars Express.
© Esa/DLR/FU Berlin (G. Neukum)

Contexte de la prospective scientifique

Enjeux scientifiques de l'exploration planétaire pour le Cnes

L'exploration planétaire du XXI^e siècle fait l'objet de plusieurs études de prospective menées par différents organismes, français ou étrangers. La prospective de la Nasa (*Decadal study*) décrit des objectifs prioritaires pour l'exploration spatiale et entraînera, en raison du poids de la communauté planétologique américaine, un élan international.

Cependant, les enjeux de l'exploration pour la communauté française, ou pour l'Agence spatiale européenne, doivent se définir de manière indépendante, des enjeux politico-industriels n'étant jamais absents d'une description scientifique, si objective soit-elle, de la prospective dans le domaine spatial. Les thématiques scientifiques clés, qui conditionnent le positionnement de la communauté française en planétologie, sont décrites de manière très complète dans le rapport du Programme national de planétologie (PNP) (*Bilan et Perspectives* 1999-2002), et seules les grandes lignes en seront rappelées ici. Celles-ci guideront les choix de priorités en matière d'exploration planétaire, en ayant à l'esprit

l'environnement européen qui conditionne les possibilités de mission au Cnes. Les thématiques scientifiques peuvent s'organiser autour de deux axes principaux, **l'origine du système solaire** et la **planétologie comparée**. Les éléments principaux d'étude peuvent en être résumés comme suit :

- > **Origine du système solaire** - processus de formation et d'évolution des planètes :
 - Étude de la matière primitive (comètes, astéroïdes primitifs),
 - Accrétion planétaire (structure interne des planètes telluriques, atmosphère primitive des planètes telluriques, atmosphère des planètes géantes) ;
- > **Planétologie comparée** :
 - Couplage interne surface/atmosphère/ géodynamique,
 - Le premier milliard d'années des planètes (différentiation des planètes, tectonique primitive, émergence de la vie sur Terre),
 - Habitabilité à long terme et évolution climatique,
 - Planètes géantes et relations avec les exoplanètes.

Les relations avec les autres domaines scientifiques sont nombreuses :

- > avec le groupe **Soleil-héliosphère-magnétosphère** se poursuivent des relations établies depuis longtemps, dans l'étude des magnétosphères planétaires et l'érosion atmosphérique des planètes ;
- > avec le groupe **Astronomie**, des évolutions récentes rapprochent l'étude du milieu interstellaire et de la matière cométaire. L'étude des planètes extrasolaires est clairement un domaine partagé, avec en particulier l'extrapolation des planètes géantes aux planètes extrasolaires ;
- > avec le groupe des **Sciences de la Terre** se situe la problématique de l'exploration martienne, qui a en particulier été fortement soutenue en géochimie ces dernières années pour la préparation aux futurs retours d'échantillons ;
- > Enfin, parmi ces thématiques, plusieurs se rattachent au domaine de l'**exobiologie** et seront à rapprocher du rapport de ce groupe. Il s'agit en particulier des environnements planétaires primitifs, avec la formation des atmosphères des planètes telluriques et de la matière organique primitive. D'autres, comme celles associées à

l'habitabilité, c'est-à-dire la capacité des planètes (voire des satellites de planètes géantes) à maintenir une zone accessible à d'éventuels développements biologiques (ou prébiotiques), sont à l'interface des deux groupes.

De ces thématiques scientifiques, on dégagera trois catégories de thèmes d'exploration proprement dits qui pourront permettre de développer des axes d'exploration pour des missions à des échéances plus ou moins proches, selon leurs ambitions :

- > **Mars** (auquel on rattachera les planètes telluriques, en y incluant la Lune) ;
- > **Petits corps** (astéroïdes et comètes) ;
- > **Planètes géantes** (et leur environnement).

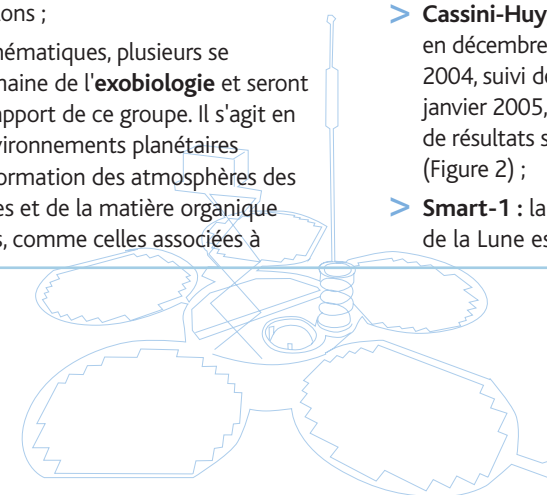
Ces trois axes sont couverts par des équipes de planétologie dans les laboratoires français, avec des compétences internationales reconnues. La définition de nouvelles missions dans chacun d'entre eux est un enjeu de la prospective au niveau mondial. L'insertion souhaitée du Cnes dans ce cadre fait l'objet de cet exercice de prospective pour le groupe Système solaire.

Missions en cours ou décidées

L'exercice de prospective s'appuie sur les missions les plus récentes qui donnent l'impulsion à de nouvelles questions qu'auront à résoudre les missions futures. La planétologie européenne est particulièrement riche en résultats spatiaux en 2004, avec les missions suivantes, dont le *Committee on space research* a fait un brillant état des lieux en juillet 2004 :

- > **Mars Express** : l'orbiteur de Mars Express a déjà, dès la phase de mise au point (*commissioning*) encore en cours en juin 2004, produit une quantité impressionnante de résultats sur les glaces, les minéraux, l'atmosphère et l'environnement ionisé de Mars (Figure 1) ;
- > **Cassini-Huygens** : après le passage à Jupiter en décembre 2000, l'arrivée sur Saturne le 1^{er} juillet 2004, suivi de l'arrivée du module Huygens en janvier 2005, une moisson sans précédent de résultats scientifiques se dessine déjà (Figure 2) ;
- > **Smart-1** : la phase opérationnelle autour de la Lune est prévue pour janvier 2005,

*Président du groupe Système solaire, Observatoire de Meudon.



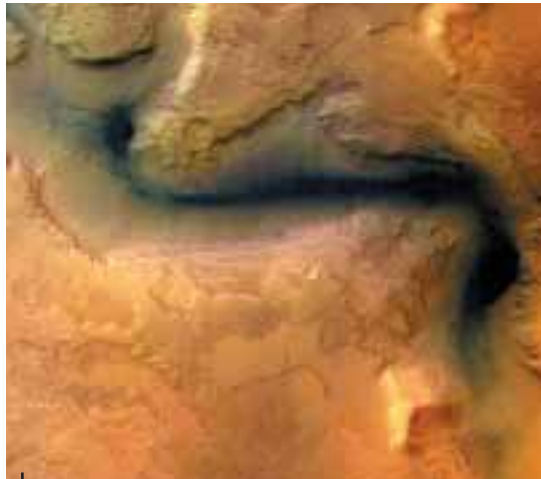


Figure 1 : L'orbiteur de Mars Express à déjà produit une quantité impressionnante de résultats.
©Esa/DLR/FU Berlin (G. Neukum)

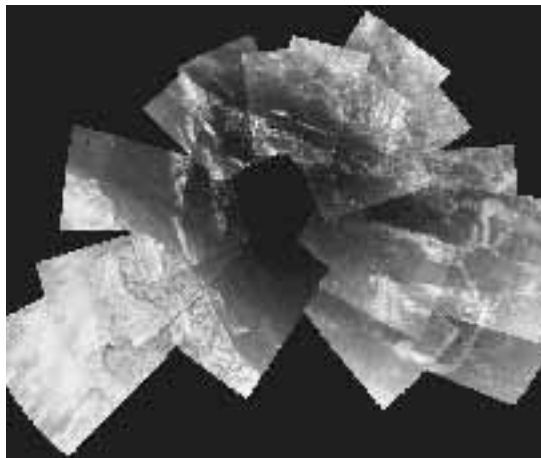


Figure 2 : Titan vu par la sonde Huygens. Mosaïque de 30 images individuelles prises entre 8 et 13 km d'altitude montrant la zone survolée et le site d'atterrissage.
©Esa/Nasa/University of Arizona

mais la mission, dont les objectifs sont en priorité technologiques, a parfaitement fonctionné et livre ses premiers résultats ;

- > **Rosetta** : après le lancement réussi le 2 mars 2004 et la vérification des instruments au printemps 2004, la mission entre en phase de croisière, avec des rencontres avec les planètes telluriques entre 2005 et 2007, et des astéroïdes (Steins en 2008 et Lutetia en 2010) ;
- > **Vénus Express** : cette mission, décidée fin 2002, est en phase de réalisation pour un lancement

prévu en novembre 2005, une arrivée en avril 2006, et une étude en orbite de Vénus (de la surface à l'exosphère) pendant au moins deux ans. Les instruments de Vénus Express sont à l'été 2004 en phase d'intégration sur le satellite, dont le planning suit un cours nominal.

En dehors de ces missions Esa, où la participation du Cnes a permis aux scientifiques français de jouer un rôle important, il faut mentionner des participations à d'autres missions : celles de la Nasa comme les atterrisseurs martiens Mer 2003, l'orbiteur Mro 2005, la mission Discovery d'étude du vent solaire, Genesis et des participations aux futures missions lunaires japonaises de la Jaxa (Lunar A, Selene).

Missions prochaines (phase B)

Deux missions concernent tout particulièrement la communauté scientifique française : Bepi-Colombo, mission pierre angulaire Esa, prévue pour un lancement en 2012, et Mars science laboratory de la Nasa qui doit être lancée en 2009 :

- > **Bepi-Colombo (2012)** : le soutien du groupe Système solaire à cette mission Esa, affiché en 2003 par différents messages sur la base de l'intérêt réaffirmé par les laboratoires pour cette mission, s'est vu confirmé par les réponses à l'appel d'offres à l'orbiteur planétaire (MPO), rendues le 15 mai 2004. Sans préjuger des sélections d'expériences par les comités, une participation importante de la communauté française à cette mission est proposée, ainsi que sur l'orbiteur magnétosphérique (MMO), qui concerne plus spécifiquement le groupe SHM.
- > **Mars science laboratory (2009)** : de la même façon, plusieurs laboratoires français ont proposé des expériences ou des participations à des expériences Nasa (caméras, spectrométrie et spectrométrie de masse, etc.) pour l'étude *in situ* de Mars. Cette mission est aujourd'hui la principale opportunité nouvelle assurée pour la continuation de l'exploration martienne (après Mars Reconnaissance Orbiter 2005, déjà engagée).

Bien que le financement d'expériences sur ces missions ne soit pas du ressort de la prospective, en

raison de la proximité des démarrages des phases de réalisation dès 2005, il est nécessaire de rappeler ici l'intérêt qu'elles suscitent et la nécessité d'un engagement budgétaire important. Ces missions forment la "condition initiale" de cet exercice de prospective, en plaçant les objectifs futurs au-delà des mesures attendues pour leur réalisation. En rappelant que pendant la décennie précédente les laboratoires ont fourni en planétologie des charges utiles sur une mission "pierre angulaire" (Rosetta) et une mission "flexible" (Mars Express), un engagement du même niveau est indispensable pour assurer un simple maintien à niveau de la recherche spatiale planétaire française.

Rapports actualisés des groupes techniques

Les rapports des différents groupes techniques, réactualisés, ne seront pas rediscutés ici, mais leurs conclusions ont été prises en compte dans les discussions du groupe Système solaire. Il faut en particulier souligner la recommandation exprimée par le groupe Exploration en faveur d'un colloque permettant de définir les objectifs respectifs de l'*in situ* et du retour d'échantillons. Le groupe de travail sur les bases de données a également remis des conclusions qui intéressent au premier chef le groupe Système solaire.

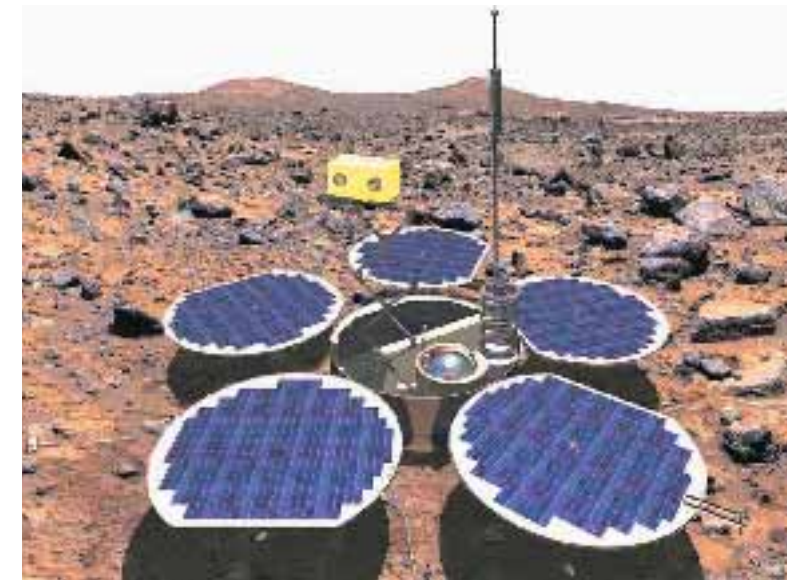


Figure 3 : Vue d'artiste du déploiement d'une station au sol de Mars, du type Netlander.

Structuration des programmes d'exploration planétaire

L'environnement international est, pour l'exploration planétaire, essentiel pour définir un positionnement du Cnes, afin de caractériser les meilleures "niches" qui pourront, avec un financement adéquat, faire progresser de manière optimale les thématiques dans lesquelles les laboratoires français pourront s'impliquer.

Mars, planètes telluriques et Lune

L'exploration de Mars est l'objectif principal, associé à l'exploration de la Lune, considérée par certains programmes comme une étape à l'exploration humaine de Mars, et donc associée à une exploration préalable par des sondes automatiques (Figure 3). L'exploration des autres planètes telluriques, Vénus et Mercure, est couverte par les missions Vénus Express, Messenger et Bepi-Colombo ; la définition d'autres missions vers Vénus, qui a été présentée dans l'appel à idées 2002 (mission Lavoisier comme pierre angulaire Esa), reviendra probablement d'actualité dans le futur, mais n'est pas mise en avant par le groupe Système solaire pour l'instant.

Missions Nasa

Les différentes missions Nasa forment aujourd'hui l'armature du programme d'exploration martien :

- > **Missions Scout** 2011, avec un appel d'offres en 2005 (deux missions à 360 M\$ à confirmer).
Une mission à quatre petits atterrisseurs qui permettrait de satisfaire les exigences d'un réseau géophysique martien est évaluée à ~ 450 M\$, soit environ 100 M\$ au-dessus du coût Nasa admis. Elle n'est donc possible que si un accord de collaboration international permet d'augmenter le financement Nasa (contribution lancement et/ou instrumentation). Un dépassement de coût, néanmoins plus faible, est également vraisemblable pour une mission à deux atterrisseurs orientée vers la recherche de l'eau si ces derniers embarquaient une charge utile réseau complétant deux stations Esa.
- > **Orbiteur lunaire** (appel d'offres en cours) : géodésie, gravimétrie, ressources pour un lancement en 2008.
- > **Atterrisseur lunaire** (technologique) : appel d'offres en 2005 pour un lancement en 2010-2011.
- > **Retour d'échantillons lunaires** (Aitken) : possible dans le cadre *New Frontiers*, si la mission est sélectionnée.

Contexte Aurora/Esa

Le programme Aurora de l'Esa est en cours de restructuration. Après l'échec de Beagle 2 et l'annulation du programme Mars Premier, il apparaît aujourd'hui comme la meilleure chance pour l'Europe de rester en course dans l'exploration de Mars, face à la Nasa, en dehors de simples participations ponctuelles aux missions américaines. Le groupe Système solaire soutient donc les idées lancées pour mettre ce programme sur pied, en soulignant l'importance des missions automatiques, quelle que soit l'évolution future de ce programme vers des vols habités ou une exploration entièrement automatique de Mars.

- > **Mission Exomars** (lancement en 2011) : l'appel à idées a été conclu avec une présélection de charge utile. L'Esa envisage de la financer. Cependant, un appel d'offres ouvert serait hautement souhaitable pour la sélection d'une charge utile optimale basée sur le mérite scientifique. Par ailleurs, le report d'Exomars, après une première mission moins ambitieuse avec démonstration

d'atterrissage sur Mars, est l'option recommandée par le groupe Système solaire. Celle-ci pourrait avoir deux composantes : robotique (exobiologie) reprenant certains des objectifs actuels d'Exomars, et une composante multisites réseau nécessitant plusieurs atterrisseurs. Le but ultime de cette mission serait la préparation d'une mission de retour d'échantillons martiens en collaboration internationale.

Collaborations bilatérales (Japon, Chine, Inde)

Pour l'instant le seul objectif affiché est l'exploration de la Lune. Des opportunités de collaborations sur la charge utile se présentent sur Selene 2/2010 (rover et atterrisseur). Un atterrisseur chinois est également envisagé à l'horizon 2010. L'Inde prévoit le lancement d'un orbiteur lunaire Chandrayaan (appel d'offres en cours) avec quelques contributions françaises attendues. Ces collaborations, qui pourraient s'étendre à d'autres cibles, sont à étudier de près dans le cadre d'une souplesse budgétaire retrouvée, car elles donnent au Cnes une réelle possibilité d'ouvrir une perspective nationale originale, sur des domaines délaissés dans les missions internationales de plus grande ampleur.

Proposition géosciences planétaires

Le groupe Système solaire affiche sa priorité à la composante martienne de cette proposition. La priorité est réaffirmée sur la géoscience martienne, l'objectif étant une science de réseau martien à plus de deux atterrisseurs. Un déploiement simultané (ou en léger différé) est nécessaire, à cause de la faible durée de vie des stations. Ceci pourrait se faire dans le cadre d'une coordination des efforts de l'Esa, de la Nasa et des agences nationales européennes pour le créneau 2011. Une Phase A devrait être menée dans le cadre du programme "exploration" Aurora de l'Esa, et il est recommandé de mener une R&T sur les senseurs *in situ* géosciences (détecteurs).

Retour d'échantillons martiens

Le retour d'échantillons martiens reste l'objectif principal de l'exploration martienne à moyen terme. La préparation des laboratoires aux analyses des échantillons est un préalable indispensable à l'implication des laboratoires français dans ce programme.

Il faut noter que le cadre du programme Aurora de l'Esa est plus large que l'exploration scientifique, puisqu'il inclut des aspects technologiques et "vols habités" jugés prioritaires par rapport à la science. Les recommandations données ici concernent donc un accompagnement scientifique à ce programme qui est jugé souhaitable dans tous les cas de figure, même si les priorités d'Aurora ne recouvrent pas exactement celles du groupe Système solaire, en particulier pour ce qui est du volet exploration lunaire.

Petits corps : comètes et astéroïdes

La mission Rosetta de l'Esa venant d'être lancée, avec des rencontres d'astéroïdes en 2008 et 2010, et la mise en orbite cométaire en 2014 autour de 69P/Churyumov-Gerasimenko, les objectifs vers d'autres missions concernent plus particulièrement les astéroïdes (Figure 4 et 4bis).

Contexte Nasa

- > **Dawn** (2006) : rendez-vous orbitaux avec Ceres et Vesta ;
- > **Deep Impact** lancé en janvier 2005 : impact cométaire prévu en juillet 2005 ;
- > **Stardust** : retour d'échantillons de poussières cométaires (janvier 2006) ;
- > **Pluto Kuiper Belt** : lancement en 2006 pour un premier survol de Pluton (pas ou très peu de participation européenne).

Autres pays

De nombreuses missions sont programmées à relativement court terme, avec :

- > **Jaxa/Muses C / Hayabusa** : rendez-vous en 2006 / retour en 2008 retour d'échantillons d'astéroïde (S) (par impact).

Ce contexte très foisonnant rend la définition d'objectifs de première grandeur nécessaire pour approfondir notre connaissance de ces objets, le retour d'échantillons s'imposant à terme comme le plus prometteur pour les astéroïdes comme pour les comètes.

Proposition au Cnes sur les astéroïdes géocroiseurs

La proposition d'une mission sur les astéroïdes géocroiseurs (*Near earth objects*) cible des objets relativement accessibles (Figure 5) qui comprennent, en raison du mélange chaotique de leur orbite, des astéroïdes de tous types, des plus primitifs aux plus évolués.

Le choix d'un objet primitif permettrait de rassembler un grand nombre d'objectifs scientifiques, dont certains communs au groupe exobiologie.

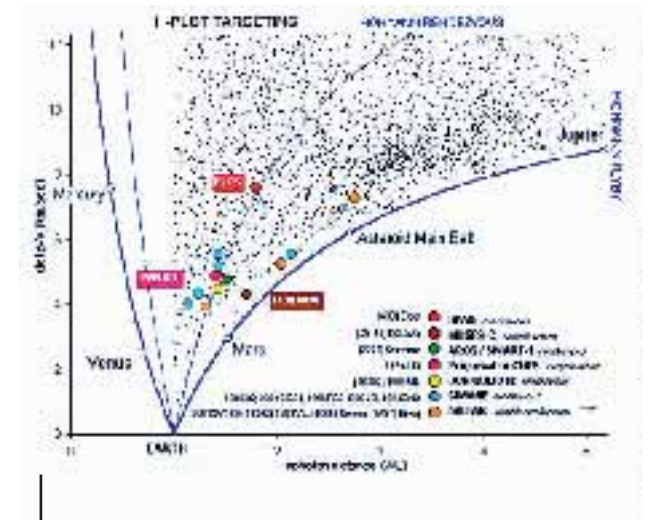


Figure 4 : accessibilité en des astéroïdes géocroiseurs avec faible δV pour une mission rendez-vous. Perozzi et al., 2000 ; *Planetary and Space science* 49, 3-22.



Figure 4bis : L'astéroïde Gaspard vu par la sonde européenne Galilée. Une mission de rendez-vous avec un astéroïde géocroiseur est proposée en coopération bilatérale.

En raison des nombreuses missions antérieures, l'intérêt scientifique recommande de préférence d'aller vers une mission ayant au minimum une composante d'analyse *in situ*, voire de retour d'échantillons à plus long terme).

Le choix du Delta V est essentiel pour minimiser le coût de la mission, ce qui fait recommander la nécessité d'une phase O/A ciblée sur une analyse de mission approfondie. Parmi les objectifs scientifiques, la tomographie par transmission pour l'analyse interne est jugée très prometteuse. Le coût d'une telle mission dépasse les capacités d'une mission Cnes seule, d'où la nécessité d'un montage de collaboration internationale solide : cadre multilatéral ou Esa indispensable. La priorité scientifique est donnée aux objectifs scientifiques de la science astéroïdale par rapport à la Lune.

Exploration du système solaire externe

L'exploration du système solaire externe au-delà de Mars, après la mission Cassini, est un objectif majeur pour le suivi des connaissances et la poursuite des travaux des équipes européennes engagées aujourd'hui dans Cassini. Cette dernière, ne répondra pas à toutes les questions, notamment sur la structure interne des planètes géantes. L'étude des satellites de Jupiter, qui a considérablement progressé avec la mission Galiléo de la Nasa, a aussi soulevé un grand intérêt, en particulier pour l'étude du satellite Europe.

Contexte Nasa post Cassini-Huygens

Trois missions américaines sont actuellement proposées dans différents cadres :

- > Jimex = mission ISS (radio) = proposition d'instrument (opportunité) ;
- > Juno = orbiteur polaire Jupiter (cadre *New frontiers*), pré-sélectionnée ;
- > Jimo = *Jupiter icy moons orbiter*, mission étudiée dans le cadre technologique des missions à propulsion électrique nucléaire.

Parmi les réponses à l'appel à idées *Cosmic vision* de l'Esa, ont été soumises des propositions de missions ultérieures vers les planètes géantes (Esa ou Esa/Nasa) : **multiprobes, orbiteur polaire Jupiter, orbiteurs satellites, atterrisseurs, etc.**

Les recommandations pour préparer de telles missions sont la nécessité de mener des actions de R&T sur

l'instrumentation (tenue aux radiations en particulier). Par ailleurs, les missions planètes géantes nécessitent en général l'utilisation d'énergie nucléaire (au minimum de *Radio-isotope heater units* (RHU)) : une implication en R&T sur ces systèmes est recommandée.

Propositions radio-science (Juno/Jimo/Jimex)

Le groupe Système solaire a été saisi de plusieurs propositions similaires concernant une instrumentation en ondes radio pour l'étude des émissions magnétosphériques de Jupiter, dans un contexte de mission d'emport de cet instrument encore à définir. Il rappelle que cette science reste toujours d'actualité, et pose surtout le problème de la définition d'une mission d'emport. Ces petites participations scientifiques doivent pouvoir entrer dans l'exercice annuel de sélection par le groupe Système solaire en dehors de l'exercice de prospective.

Microsatellite Jovis

La détection et l'identification de modes d'oscillation interne seraient une découverte majeure qui permettrait de mieux contraindre les modèles de structure interne des planètes géantes. Cette proposition de microsatellite apparaît aujourd'hui relativement mature, mais est liée à un projet d'observations au sol (Sympa), engagé par le même groupe de scientifiques, dont les résultats sont attendus à l'échelle de 1 à 2 ans et qui conditionneront la justification d'une proposition spatiale sur des objectifs complémentaires. Le groupe Système solaire recommande donc d'attendre l'analyse des premiers résultats de Sympa avant d'avancer sur cette proposition de microsatellite dont la maturité technologique progresse après quelques études en phase O.

Le contexte de la recherche dans les laboratoires

Le Programme national de planétologie

Il convient de souligner la cohérence des objectifs scientifiques d'exploration planétaire proposés par le

groupe Système solaire du Cnes avec ceux du PNP (qui englobent les observations au sol et les mesures de laboratoire). Les grandes lignes rappelées en début de chapitre sont aussi celles préconisées par le PNP. L'apport du PNP est une nécessité pour la communauté planétologique française, non seulement pour le soutien direct aux études hors missions spatiales, mais aussi pour les relations avec les équipes d'autres domaines scientifiques (spectroscopie, physique), qui sont en liaison étroite avec les équipes de planétologie.

On constate cependant depuis quelques années une décroissance du budget des programmes nationaux, et récemment la ventilation du budget 2004 en 60 % en 2004 / 40 % en 2005. Cette tendance laisse craindre une évolution négative. D'autre part, une mise à disposition plus rapide des données spatiales nécessitera des financements supplémentaires pour l'exploitation scientifique (données sol et espace).

Le groupe Système solaire rappelle l'importance du PNP pour maintenir le tissu scientifique autour des missions spatiales et recommande sa remise au niveau des années 2000, avec une croissance du budget.

Les laboratoires spatiaux

Le problème des Ingénieurs, techniciens, administratifs (ITA) va devenir crucial dans les années à venir pour le maintien de l'activité technique des laboratoires spatiaux. La mutualisation des postes apparaît insuffisante pour résoudre les problèmes posés : un point critique est atteint dans plusieurs laboratoires. Dans la gestion des instruments planétaires, il est souligné que la très haute spécificité de certaines expériences, sur *l'in situ* en particulier, avec des instrumentations de petite taille, mais "sur mesure", avec peu de possibilités de réalisation de filières, rend difficile la réalisation industrielle sur des instruments prototypes (indépendamment des questions de coûts trois fois supérieurs dans l'industrie). Les intérêts de la communauté système solaire, plus proches sur ce point de la communauté SHM, peuvent apparaître divergents par rapport à l'astronomie et ne s'accordent pas avec les recommandations formulées par l'Académie des Sciences sur ce sujet.

L'effort de R&T

La R&T est essentielle pour permettre aux équipes de répondre aux nouveaux défis posés par la participation aux futures missions. Celle-ci doit, sur ce plan, rester un élément central pour le maintien d'un savoir-faire en instrumentation spatiale dans les laboratoires. L'augmentation de la sous-traitance ne pose pas de problème particulier, mais les phases "amont" (R&T, études de définition) ainsi que les phases "aval" (exploitation des données) et le suivi de la sous-traitance doivent rester dans les laboratoires, d'où la nécessité d'un maintien minimum d'ITA pour continuer à pouvoir gérer la mise au point d'un cahier des charges et d'un suivi industriel. **La tenue d'un *workshop* fin 2004 sur l'instrumentation pour analyses d'échantillons est recommandée afin de définir les axes d'activités sur les années 2005-2007. La R&T sur les questions de développement de systèmes à radio-isotopes apparaît comme une priorité pour les missions de longue durée sur Mars, ainsi que sur les planètes géantes. Il est recommandé une analyse sur la possibilité de développement de RHU (première priorité) et de RTG³ (seconde priorité).**

Projets dans l'Union européenne

La sélection du projet Europlanet d'un montant 2 M€ sur cinq ans permet la mise en place d'un projet réunissant des laboratoires européens, favorisant les moyens de fonctionnement et l'échange entre laboratoires. Ce peut être l'opportunité du démarrage d'une réelle structuration de l'Europe spatiale planétaire. Dans le même ordre d'idée, le projet Mage sélectionné en 2002 sur le 5^e PCRD (jusqu'en 2006 avec 1,6 M€ sur 42 mois), a permis d'appuyer le projet d'étude géophysique lié à Netlander. Ces projets pourraient être un prélude à la création d'un véritable Programme planétaire européen, permettant de pérenniser des soutiens entre laboratoires européens sur le modèle du PNP.

Rapport de l'Académie des Sciences

Le groupe Système solaire a examiné le rapport de l'Académie des Sciences. Il en soutient la plupart des recommandations, avec certaines réserves sur quelques points pour lesquels la spécificité de l'exploration planétaire demande un suivi particulier :

3- Radio-isotope thermal generators (RTG).

> **Expériences spatiales** (cf. laboratoires spatiaux). Le pilotage par les laboratoires des phases A/E et la sous-traitance pour les phases B/C/D peut poser des problèmes sur les petites expériences de recherche très spécifiques développées pour l'exploration planétaire.

> **Missions petites ou moyennes au niveau national plutôt qu'Esa.**

Le point de vue du groupe Système solaire est plutôt opposé, les missions Mars et Vénus Express montrant au contraire l'importance de réunir, au-delà du niveau national, la masse critique pour ces missions.

D'autre part, la recommandation pour les opérations multilatérales au niveau européen consiste à impliquer en priorité l'Esa dans ce type de négociation.

> Les recommandations sur le **maintien des budgets dans les missions Esa**, le pilotage national de la recherche amont ou le programme de *guests investigators* est bien évidemment soutenu par le groupe Système solaire.

> Le fait que l'intérêt de l'étude d'échantillons planétaires ne soit pas mentionné dans le rapport scientifique est regrettable. Il s'agit d'une action clé pour le futur de l'exploration, avec des retours d'échantillons du vent solaire, d'astéroïdes, de poussières cométaires, puis de Mars attendus dans les prochaines années. L'implication des communautés géophysique et géochimique dans ce domaine est conditionnée par la reconnaissance de cet intérêt par la communauté et la définition de nouvelles missions.

Bases de données planétaires

Pour les surfaces planétaires, il s'agit d'une nécessité reconnue depuis longtemps, et qui, avec l'arrivée des données de Mars Express, devient très urgente. Les développements récents sont la création par l'Esa du PSA (*Planetary science archive*), qui concerne les archives "mortes" des données instrumentales (pas d'outils haut niveau, mais archivage des données de niveau 1 ou 2). Le modèle de référence reste le CDPP, mais sa remise en question récente pose le problème de la définition du niveau national (Cnes), plutôt que Esa pour la mise en place d'archives planétaires. Dans le cadre des données Mars Express et Cassini, le travail en cours et en pleine évolution recommande d'adopter une position d'attente... La question de

l'évolution vers un système de gestion de données du type PDS (*Planetary data system* / Nasa) européen est posée, comprenant le niveau au-delà du PSA (cité plus haut), impliquant une activité scientifique et au minimum la nécessité d'un outil de coordination européen. Dans ce cadre, le projet de base de données atmosphère Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL) est un effort à poursuivre.

Recommandation

La communauté planétologique au niveau français est probablement insuffisante pour justifier le fonctionnement d'un système d'archivage à l'échelle nationale et l'échelle européenne paraît s'imposer.

Retour sociétal

L'intérêt des missions planétaires pour la communauté scientifique est aussi à étendre aux milieux étudiants et scolaires (un intérêt d'ailleurs étendu aux sciences de l'Univers en général). C'est également vrai pour le grand public, comme le montre le succès des manifestations publiques (portes ouvertes, émissions dans les médias) associées aux phénomènes astronomiques. L'intérêt porté à l'entrée de la sonde Huygens dans l'atmosphère de Titan en est une preuve.

L'ouverture vers les médias et la prise en compte des retombées médiatiques des missions spatiales doit faire partie de la définition des missions nouvelles. Mais cette activité demande un budget spécifique permettant la participation de professionnels du domaine.

Recommandations

Les spécificités de l'exploration planétaire font que ses recommandations s'insèrent mal dans le cadre proposé pour cet exercice de prospective du Cnes :

> **pas de proposition pour une mission planétaire de vol en formation** : la haute résolution en planétologie est obtenue en s'approchant des cibles, et non par l'accès à la haute résolution angulaire ;

> **peu de micromissions**, dont le cadre se prête mal aux missions d'exploration planétaire.

Au-delà des soutiens aux missions Bepi-Colombo et Mars Science Laboratory, qui doivent trouver leur place dans le programme à moyen terme à la hauteur des ambitions affichées, les priorités dégagées sont :

> **Priorité 1 : Mars**

Pour une mission multisites (exobiologie + géophysique) avec priorité à la géoscience martienne, l'objectif étant une science de réseau martien à plus de deux atterrisseurs.

Un déploiement simultané (ou en léger différé) est nécessaire (en raison de la durée de vie des stations). Ceci pourrait se faire dans le cadre d'une coordination des efforts de l'Esa, de la Nasa et des agences nationales européennes pour le créneau 2011. Une Phase A est à mettre en place dans le cadre du programme Aurora de l'Esa, et il est recommandé de mener une R&T sur les senseurs *in situ* géosciences (détecteurs).

Le retour d'échantillons martiens reste l'objectif principal de l'exploration martienne à moyen terme.

La préparation des laboratoires est un préalable indispensable à l'implication des laboratoires français dans ce programme.

Demande d'une analyse de mission (Phase A) par l'Esa dans ce cadre.

> **Priorité 2 : astéroïdes géocroiseurs**

En raison des nombreuses missions antérieures vers les astéroïdes et les comètes, l'intérêt scientifique recommande de préférence d'aller au minimum vers une mission *in situ* (voire à terme une mission de retour d'échantillons). Le choix du Delta V est essentiel pour minimiser le coût de la mission, ce qui conduit à recommander une phase O/A ciblée sur une analyse de mission approfondie. Parmi les objectifs scientifiques en télédétection, la tomographie par transmission pour l'analyse interne est un élément novateur. Le coût d'une telle mission dépasse les capacités d'une mission Cnes seule, d'où la nécessité d'un montage de collaboration internationale solide. Le cadre multilatéral Esa est donc indispensable.

La priorité du groupe Système solaire (GTSS) va aux objectifs scientifiques de la science astéroïdale par rapport à la Lune. Demande d'une analyse de mission (Phase O/A) par le Cnes.

> Parmi les réponses à l'appel à idées *Cosmic vision* de l'Esa, il est prévu des propositions de missions ultérieures vers les planètes géantes (éventuellement en collaboration Nasa). Les recommandations pour préparer de telles missions sont de préparer une R&T sur l'instrumentation (tenue aux radiations en particulier).

Soutien à une R&T dans les laboratoires français pour qu'ils s'impliquent dans de futures missions d'exploration du système solaire extérieur.

> La R&T sur les questions de développement de systèmes à radio-isotopes apparaît comme une priorité pour les missions de longue durée sur Mars, ainsi que vers les planètes géantes.

Il est recommandé une étude sur la possibilité de développement de RHU (première priorité), et de RTG (seconde priorité).

> **Recommandation sur les bases de données planétaires**

La communauté planétologique au niveau français est probablement insuffisante pour justifier le fonctionnement d'un système d'archivage à l'échelle nationale et l'échelle européenne paraît s'imposer. Une coordination des efforts entre le Cnes, l'Esa et les instances européennes est indispensable.

> **Le groupe Système solaire rappelle l'importance du PNP pour maintenir le tissu scientifique autour des missions spatiales et recommande sa remise au niveau des années 2000, avec une croissance du budget.**



Vue d'artiste d'un trou noir.
©Ciel et espace

Introduction

Les recommandations du groupe astrophysique sont fondées sur plusieurs ensembles d'informations :

- > Les résultats de l'exercice de prospective de l'Insu au printemps 2003 ;
- > Les résultats de l'exercice de prospective initiée par la section astroparticules du Comité national au printemps 2004 ;
- > Les résultats des groupes technico-scientifiques mis en place par le Cnes en 2002 ;
- > L'évaluation technique des propositions par les équipes techniques du Cnes.

Et évidemment sur l'évaluation des idées et des propositions envoyées en réponses aux appels à idées du Cnes en 2001 et fin 2003. Le tableau suivant donne une idée de la répartition de ces propositions par classe de missions :

	2001	2003
Vol en formation	4	8
Minisatellites	6	3
Microsatellites	3	2
Instruments et missions d'opportunité	10	8
Ballons	3	2
R&D	5	3

*Commissariat à l'énergie atomique, Département d'astrophysique, de physique des particules et de l'instrumentation associée (CEA/Dapnia).

La première étape fut la définition des thématiques prioritaires, classées en trois catégories :

- > Les objets astrophysiques et le contenu de l'Univers ;
- > La physique des objets complexes ;
- > L'Univers comme laboratoire de physique.

En fonction de ces priorités, nous avons examiné toutes les idées envoyées par la communauté et nous les avons classées par priorité, en distinguant celles qui entraient dans le cadre d'un exercice de prospective sur les dix ans à venir, et celles qui devaient faire l'objet de R&D pour préparer des missions au delà de 2014.

L'ensemble de ces recommandations ont été présentées à la réunion du Ceres des 16 et 17 juin 2004, et elles ont servi de base aux recommandations finales du Ceres.

Analyse scientifique

L'analyse scientifique s'organise autour de trois axes : les grands domaines restant à approfondir, l'astrophysique des systèmes complexes et l'utilisation des milieux astrophysiques comme laboratoire de physique. Ce cadre a servi à identifier les besoins d'observations relevant de missions spatiales et, de là, à sélectionner les missions nécessaires en les organisant dans une perspective de long terme.

Les grands chantiers actuels de l'astrophysique

La cosmologie

La cosmologie étudie l'évolution globale de l'Univers et l'histoire de sa structuration. Elle doit donc recenser les contributions à son contenu et les mécanismes contrôlant son évolution. Les échelles de temps, d'espace et d'énergie qu'elle explore la mettent naturellement en position de poser, voire de résoudre, des questions de physique fondamentale.

Plus précisément, on peut identifier dans la cosmologie observationnelle d'aujourd'hui deux grands axes de recherche :

- > la détermination des paramètres cosmologiques, notamment du **taux d'expansion de l'Univers** et de son accélération aujourd'hui, ainsi que le recensement et la caractérisation des diverses composantes de l'Univers (densités d'énergie, équations d'état) ;
- > la caractérisation des **structures de l'Univers**, pour les différentes composantes, aux différentes échelles et époques, déterminer leur origine et leur développement temporel. Il s'agit de valider et détailler le modèle qui s'est progressivement imposé tant en ce qui concerne les valeurs des paramètres que pour le scénario général qui relie les fluctuations quantiques primordiales aux anisotropies du corps noir cosmologique (CMB) et à la distribution des premiers objets lumineux, des galaxies, des amas et de la matière sombre.

Les méthodes sont surtout astrophysiques, mais le domaine se situe naturellement à l'interface de l'astrophysique, de la physique théorique et de la physique des particules.

Les progrès observationnels ont permis plusieurs avancées cruciales aux cours des cinq dernières années. La mesure des anisotropies du corps noir cosmologique (avec les expériences embarquées en ballons, Boomerang, Maxima, Archeops) a d'abord permis de déterminer que la **courbure spatiale de l'Univers est proche de zéro**. Cela a finalement permis de trancher un très long débat sur la densité d'énergie totale de l'Univers : elle est très supérieure aux recensements astrophysiques classiques, recensement direct en étoiles et gaz, ou indirect par l'effet dynamique de la matière gravitante. Par ailleurs, les comptages de supernovae de type Ia ont montré une expansion actuellement en accélération, ce qui s'explique par la présence d'une constante cosmologique non nulle dont l'interprétation reste ouverte : caractéristique fondamentale des lois de la gravité ou énergie du vide ? **Cette "énergie noire" pose un problème théorique fondamental**. Les résultats de février 2003 de mesure des anisotropies du CMB par le satellite WMAP confirment, maintenant indépendamment des supernovae, l'existence de cette énigme théorique.

Les résultats les plus spectaculaires de la deuxième approche proviennent des analyses des **déformations d'images de galaxies lointaines par effet de lentilles gravitationnelles**. Ces études ont permis de caractériser la distribution de la matière noire dans les amas de galaxies et, à plus grande échelle, permettent de contraindre les modèles cosmologiques de manière indépendante des études du CMB ou des supernovae. L'étude des amas de galaxies distantes et des grandes structures permet d'obtenir des contraintes indépendantes mais produisant là encore des résultats similaires en ce qui concerne les contraintes sur les modèles cosmologiques.

L'Univers dans lequel nous vivons apparaît comme un cocktail surprenant : **~3/4 d'énergie noire** dont l'effet net est répulsif et qui tend à accélérer l'expansion de l'Univers, **~1/4 de matière noire** froide qui n'interagit pas électromagnétiquement, de dispersion de vitesse négligeable, mais dont la présence se fait sentir dans la dynamique des galaxies et des amas ou dans la déformation de l'image d'objets d'arrière-plan. Bien que de nombreux candidats aient été proposés, la particule correspondant à cette matière noire n'a pas encore été détectée en laboratoire, mais la sensibilité des expériences de détection atteint aujourd'hui le domaine de masse et de section efficace pour lequel il existe des candidats réalistes dans le cadre des théories supersymétriques. Les atomes usuels des étoiles et du gaz, ou baryons, ne contribuent qu'environ 5 % du tout, en accord avec les inférences du CMB et de la nucléosynthèse.

Ce recensement offre un cadre pour le modèle de formation des structures de l'Univers, en accord avec l'ensemble des observations, mais qui demande à être validé plus précisément, et surtout à être grandement détaillé car de nombreux aspects restent mal compris. En bref, les fluctuations quantiques primordiales, peut-être issues d'une phase d'inflation aux tous premiers instants de l'Univers, ont plus tard laissé leur empreinte sur le rayonnement CMB quand l'Univers est devenu transparent quelques centaines de milliers d'années plus tard, puis se sont développées par instabilité gravitationnelle jusqu'à permettre la formation des premiers objets liés rassemblés au sein de structures moins marquées à plus grande échelle : amas, filaments. Les halos sont dominés par la matière noire dont la formation entraîne le gaz baryonique. Les chocs qui se développent augmentent la densité

du gaz qui peut alors se refroidir, former un disque puis des étoiles. Ces étoiles et les disques d'accrétion des trous noirs peuvent à leur tour rétroagir sur l'évolution du gaz, que ce soit par leurs photons ionisants, des vents supersoniques ou l'expansion des restes de supernovae... La formation d'objets liés à des échelles de plus en plus grandes induit des fusions successives et aboutit à une vision hiérarchique de la formation des structures. C'est là l'ensemble de la problématique de la formation des galaxies, détaillée séparément par ailleurs (Figures 1a et 1b).

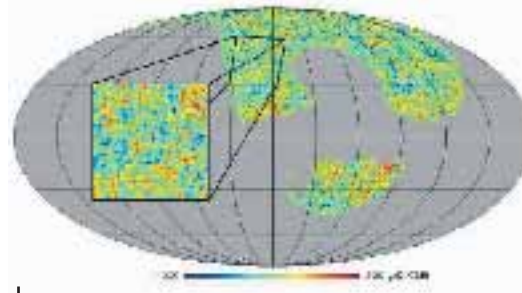


Figure 1a : Carte des fluctuations du fond diffus cosmologique obtenue avec le ballon Archeops. Le satellite Planck Surveyor, lancé en 2007, devrait permettre d'obtenir des cartes de meilleure résolution et couvrant tout le ciel. L'étape suivante sera la mesure précise de la polarisation de l'émission du fond diffus cosmologique.

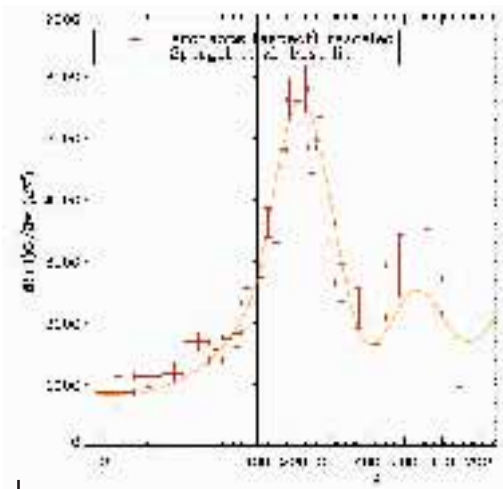


Figure 1b : Spectre de puissance des fluctuations du fond diffus cosmologique, en fonction de la résolution spatiale. Les points sont ceux déterminés avec Archeops, la ligne continue représente le meilleur "fit" des données obtenues par le satellite américain WMAP. Planck devrait permettre d'obtenir une bien meilleure précision pour les points à haute résolution spatiale.

Comment progresser ? Dans un futur proche, les progrès sont à attendre de la prochaine génération d'expériences de mesure des anisotropies du CMB, de comptage de supernovae et de cartographie de l'effet de cisaillement gravitationnel des images de galaxies d'arrière-plan par la distribution de matière sombre en avant-plan. Pour la mesure des anisotropies du CMB, outre de nombreuses expériences ballon - dont le ballon français **Archeops** - et le satellite américain **WMAP**, la référence sera le satellite **Planck** dont le lancement est prévu par l'Esa en 2007. **Le grand bond en sensibilité et résolution permettra la cartographie définitive des anisotropies de températures et des mesures détaillées de la polarisation du fond diffus cosmologique.** Outre la fixation précise du cadre de référence pour la formation des structures, il sera enfin possible de vérifier les prédictions des modèles d'inflation les plus simples et d'exclure nombre de possibilités théoriques plus exotiques (Univers à très faible courbure positive, inflation à champs multiples, présence de défauts topologiques, de champs magnétiques primordiaux, de dimensions supplémentaires, etc.) ou, au contraire, de détecter des déviations lourdes d'implications fondamentales. Les relevés au sol en cours, notamment le CFHT-LS qui débute, vont aussi faire progresser considérablement les mesures de comptages de supernovae et des cartes de cisaillement gravitationnel pour tester la solidité du modèle actuel et mieux préciser la valeur de paramètres essentiels (comme la variance des fluctuations de matière à l'échelle de non linéarité). Une expérience de laboratoire comme Edelweiss a, par ailleurs, le potentiel de déterminer la nature des particules constituant la matière noire.

Cette prospective tente de dégager les moyens spatiaux à mettre en œuvre pour aller plus loin, car toutes ces expériences seront loin d'épuiser le potentiel de ces diverses approches et laisseront ouvertes des questions fondamentales qui sont néanmoins à notre portée. Deux types de missions sont envisageables : l'une consacrée à l'étude de la polarisation du CMB, CMBPOL/Epic et l'autre d'imagerie à grand champ, pour l'étude des supernovae lointaines et l'obtention de cartes de cisaillement gravitationnel, JDEM/Snap. Dans les deux cas, un des objectifs particulièrement excitant est la **caractérisation de l'équation d'état de l'énergie noire qui pourrait se révéler variable temporellement, signe d'un nouveau champ fondamental de la physique**. De tels projets sont envisagés aux

États-Unis dans le cadre du programme *Einstein Probes*. Le calendrier de telles missions aux États-Unis est très incertain, mais elles ne pourront être réalisées qu'après 2015, au plus tôt. Des missions plus petites pourraient être réalisées avec un calendrier plus rapide dans un cadre Esa, voire national ou bilatéral. De telles missions ont été présentées au Cnes et à l'Esa : Sampan pour la polarisation du CMB et Dune pour l'imagerie grand champ. Des phases 0 de ces deux missions sont nécessaires pour déterminer leur faisabilité.

L'Univers à grand redshift

Longtemps fondée sur des bases théoriques, l'évolution des galaxies est maintenant très étudiée, grâce aux moyens modernes d'observation qui permettent de s'intéresser à des galaxies de plus en plus faibles donc de plus en plus lointaines. Du point de vue théorique, il y a toujours eu une différence d'approche entre des théories qui supposaient que les galaxies se formaient *grosso modo* avec leur taille actuelle, et d'autres qui supposaient que les galaxies se construisaient progressivement par fusions successives de systèmes plus petits. Pour des raisons de simplicité, les premiers modèles d'évolution furent développés autour du **concept de galaxie isolée**, puis, sous l'influence des théories cosmologiques de formation des grandes structures, les modèles par fusion hiérarchique furent progressivement élaborés. La confirmation de la validité des modèles par **fusion hiérarchique** est venue en premier des observations dans le visible, tout d'abord au CFH, avec le Canada-France-Redshift-Survey, puis avec le Hubble Space Telescope, en particulier avec les observations du Hubble deep field (HDF). Ces observations ont révélé l'existence d'une population de galaxies de petite taille et relativement bleues. Cette population de galaxies est absente des populations locales de galaxies. Traduites en termes de taux de formation d'étoiles, ces observations montrent un taux plus élevé d'un facteur ≈ 3 à un *redshift* $z \approx 1$ comparé à celui que l'on observe dans les galaxies actuelles.

Les satellites infrarouges, Iras puis Iso, ont montré l'existence de **galaxies émettant principalement dans l'infrarouge** en raison de l'absorption du rayonnement interstellaire par les poussières et de l'émission thermique de ces dernières. Certaines galaxies ultra lumineuses dans l'infrarouge émettent cent fois plus d'énergie dans l'infrarouge que dans le visible. En moyenne, la mesure du fond

diffus extra galactique infrarouge a montré que les galaxies ont émis trois fois plus d'énergie dans l'infrarouge que dans le visible au cours de leur histoire. Avec les données Iso, on a pu montrer que les grandes galaxies, déjà formées à $z \approx 1$ étaient cent fois plus nombreuses à être lumineuses en infrarouge que les galaxies locales. Traduit en termes de formation d'étoiles, on constate une augmentation d'un facteur vingt entre la période actuelle et l'Univers à $z \approx 1$. Très vraisemblablement, ce fort taux de formation d'étoiles est lié à des épisodes de fusion de galaxies générant des flambées de formation d'étoiles. Il faut maintenant valider ce scénario et pousser les études à des *redshifts* plus élevés. Le satellite américain Spitzer va permettre d'étendre les résultats d'Iso, mais en restant toujours dans l'infrarouge moyen. Dans l'infrarouge lointain, qui est plus apte à détecter des galaxies très lointaines, **Herschel**, qui sera lancé en 2007, devrait permettre des résultats significatifs. Malheureusement Herschel sera limité par la confusion et ne permettra pas de dépasser un *redshift* de 2 à 3. Les missions futures auront pour but d'étudier les galaxies encore plus lointaines, soit dans la recherche de l'émission stellaire dans l'infrarouge proche avec l'instrument Nirspec du JWST qui devrait être lancé vers 2013, soit dans l'émission dans les poussières avec l'instrument infrarouge moyen MIRI sur le même JWST et, plus tard, dans l'infrarouge lointain avec une mission qui reste encore à définir. Cette mission pourrait être un télescope monolithique d'une dizaine de mètres de diamètre, ou un interféromètre. Une telle mission pourrait voir le jour après 2015.

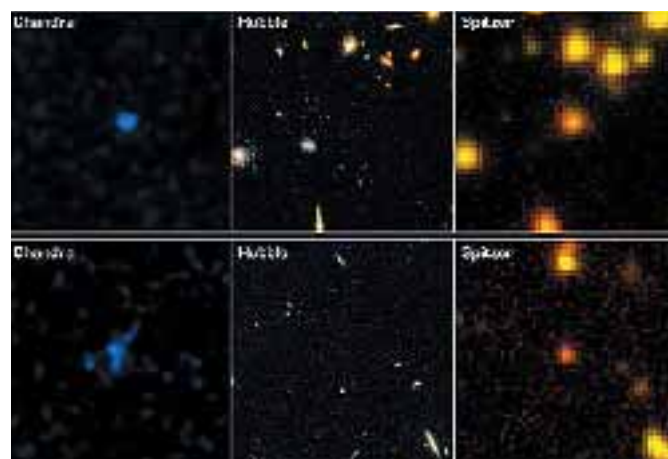


Figure 2 : Images de 2 champs observés par trois observatoires spatiaux, Chandra en rayons X, le *Hubble space telescope (HST)* dans le visible et Spitzer dans l'infrarouge. Les observations en rayons X et en infrarouge sont indispensables pour observer des galaxies et des quasars à grande distance cosmologique. Ces objets sont très souvent profondément enfouis dans des zones de poussières qui absorbent toute la lumière visible. Même le HST n'est pas capable de percer ces nuages. Il faudra attendre son successeur, le James webb space telescope (JWST), pour observer aussi ces galaxies et trous noirs dans le visible.

©Nasa/JPL Caltech

Grâce à des observations d'origines très diverses, on sait maintenant qu'il y a des **trous noirs super massifs au centre de nombreuses galaxies**. Ces trous noirs peuvent être actifs en terme d'accrétion comme dans les AGN et les quasars, ou dormants, comme dans notre galaxie. On sait aussi que les quasars sont tous associés à une galaxie hôte. Il existe une continuité entre les phénomènes que l'on observe dans les quasars, les galaxies à noyaux actifs et les régions centrales de galaxies normales. Les observations en infrarouge et X ont également montré qu'une grande fraction des AGN et des quasars sont extrêmement enfouis dans de la poussière et pratiquement invisibles en dehors des X durs et de l'infrarouge lointain. Si on perçoit mieux maintenant la typologie de ces différents objets, on ne comprend toujours pas comment ils sont reliés entre eux. Y-a-t'il un lien évolutif entre les différentes phases, est-ce que toutes les galaxies passent par une phase de type quasar ? Qu'est ce qui se forme en premier, les trous noirs ou les galaxies hôtes ? Autant de questions non résolues. En obtenir les réponses nécessitera de combiner des observations sol et espace, en particulier en X, en infrarouge et en sub-millimétrique. En particulier, il sera extrêmement important, pour étudier la population des AGN enfouies qui font presque tout le fond diffus X, de pouvoir faire des études en X dur, dans le domaine non thermique au-delà de 10 keV, avec des sensibilités et des résolutions spatiales comparables à celles d'XMM à plus basse énergie. C'est le but du projet Simbol-X que le groupe Astrophysique propose pour une phase 0 et à plus long terme du projet Xeus étudié à l'Esa pour un lancement après 2015.

Les premières observations en trois dimensions de la distribution des galaxies ont mis en évidence la **distribution très inhomogène des galaxies**. Elles sont regroupées dans des **amas** et des **filaments**, laissant de grandes zones presque vides. Cette structure en forme de toile a été confirmée à tous les *redshifts* où l'on a pu faire ce type de relevé. Les simulations numériques permettent maintenant de comprendre la formation de ces grandes structures et la distribution à grande échelle de la matière. Néanmoins, il y a peu d'observables dès que l'on atteint des *redshifts* supérieurs à 1. Jusqu'à quels *redshifts* peut-on observer des amas de galaxies ? Comment se distribuent les galaxies par rapport aux grandes structures ? Ces questions cruciales pour contraindre les modèles cosmologiques seront partiellement résolues par des observations grand champ dans le visible, en infrarouge et en X, avec les observatoires actuels jusqu'à des *redshifts* de l'ordre de 1. Il faudra la génération suivante pour atteindre des *redshifts* plus importants.

On vient de démontrer très récemment qu'il est possible de déterminer la distribution de la matière noire à grande échelle en étudiant les déformations apparentes des galaxies lointaines sous l'influence du champ gravitationnel traversé par la lumière émise par ces galaxies. Tant qu'elle se limite à des observations dans le visible, cette méthode ne permet de mesurer la distribution de matière noire que jusqu'à des *redshifts* de 0,5. Pour aller au-delà, il faut disposer d'un imageur grand champ en infrarouge proche spatial. C'est un des buts de la mission JDEM prévue aux États-Unis dans le cadre des *Einstein Probes*. Mais ce programme scientifique pourrait être atteint avec une mission moins ambitieuse qui pourrait être réalisée dans un cadre européen ou dans une mission de type Midex à laquelle la France pourrait participer de manière minoritaire. C'est le projet **Dune** qui a été mentionné précédemment.

La formation des étoiles

La formation des étoiles reste, encore de nos jours, l'un des grands enjeux de l'astrophysique. C'est un problème très vaste qui rejoint celui de la formation des structures cosmiques en général, des grandes structures de l'Univers aux galaxies. En effet la physique mise en jeu peut être qualifiée de nouvelle puisqu'elle met en œuvre des processus à courte portée bien décrits par la thermodynamique classique comme les collisions entre particules, des couplages non-linéaires entre de vastes

gammes d'échelles et la gravité, de portée infinie. Il s'agit là de la difficulté essentielle soulevée par la formation de structures auto-gravitantes.

Comprendre la formation d'étoiles, c'est comprendre ce qui la déclenche ou ce qui l'inhibe, ce qui détermine la distribution de masse des étoiles formées, les rôles respectifs dans cette distribution de l'accrétion compétitive entre plusieurs embryons stellaires et de la fragmentation, ce qui détermine la formation de systèmes stellaires ou planétaires plutôt que d'étoiles simples, ainsi que le lien observé entre accrétion et éjection. Or les nuages de gaz moléculaire dans lesquels se forment les étoiles sont, à l'instar des galaxies et de toutes les structures cosmiques, des systèmes ouverts et hors équilibre pour lesquels l'origine d'un événement quelconque est nécessairement multi-échelles et fait intervenir une histoire qui s'est développée sur des laps de temps allant des quelques derniers milliers d'années à des âges nécessairement proches de l'âge de l'Univers.

Si l'on complète cette brève mise en perspective des questions ouvertes sur la formation d'étoiles en faisant remarquer que les flots de matière qui les engendrent sont turbulents et magnétisés, on comprendra que **la seule simulation numérique ne permettra pas de résoudre ces problèmes théoriques**. Elle reste indispensable pour mieux cerner les interactions non-linéaires couplant des échelles sur plusieurs ordres de grandeur. Mais cela doit aller de pair avec un effort observationnel de même envergure.

En effet, dans ce domaine, l'Univers proche comme l'Univers lointain doivent être sondés du fait de la nécessité d'appréhender l'histoire de la formation d'étoiles, de l'observer se produire dans des environnements profondément différents et distribués dans le temps et l'espace. Quant à l'Univers proche, il permet d'y observer ce phénomène comme à la loupe, d'y chercher les signatures les plus ténues des premières étapes de l'effondrement. Cependant, les problèmes soulevés par l'observation, quelle qu'en soit la longueur d'onde, sont très spécifiques. Il n'y a pas, en effet, l'équivalent du diagramme Hertzsprung-Russell des étoiles pour les régions de formation d'étoiles, les nuages moléculaires ou les galaxies. N'étant pas des systèmes isolés, leur évolution dépend des innombrables paramètres décrivant leur environnement et leur histoire.

Observer depuis l'espace est indispensable à deux titres : parce que, d'une part, l'essentiel de l'énergie rayonnée par le gaz, qui lui permet l'effondrement, l'est dans des raies de rotation de la molécule d'eau, inobservables depuis le sol (domaine sub-millimétrique) et, d'autre part, parce que l'essentiel de la matière moléculaire est sous forme de di-hydrogène dont les transitions d'énergie les plus basses sont elles aussi inobservables du sol (dans l'infrarouge moyen). La très haute résolution spectrale est également nécessaire ($> 10^4$) pour avoir accès à la dynamique du gaz, mais aussi pour faire de la vitesse projetée une véritable dimension d'espace et s'affranchir ainsi en partie de la confusion introduite par les effets de projection. Plusieurs projets devront être combinés dans le domaine 16-800 μm pour accéder à la fois à la très haute résolution spatiale (obtenue depuis le sol avec l'interféromètre Alma et depuis l'espace avec le JWST/Miri) et la sensibilité aux sources faibles et étendues (qui est déjà l'un des points forts du satellite Herschel).

Quant au **milieu interstellaire**, il ressort de ce qui précède que son évolution thermique, dynamique et chimique porte en germe la formation des étoiles futures. Mais il offre au physicien quelques belles problématiques spécifiques, indépendantes de son couplage avec la gravité comme par exemple l'origine de sa résilience ou encore pourquoi n'est-il ni totalement évaporé, ni totalement effondré en étoiles, mais comme distribué en équilibre dynamique entre plusieurs phases et un quasi-continuum d'échelles couplées les unes aux autres, l'origine de sa richesse chimique, y compris dans ses phases les plus diluées, ses sources de chauffage, ou comment la turbulence s'y dissipe-t-elle, à quelle échelle les effets de la reconnexion magnétique apparaissent-ils, ou enfin l'existence dans l'espace interstellaire diffus de structures nanométriques non identifiées (agrégats, grosses molécules, cages, ...) porteuses de signatures spectrales connues depuis des décennies dans le visible et des années dans l'infrarouge moyen. L'étude de la polarisation de la lumière émise par les poussières froides est également un moyen puissant pour mieux contraindre les modèles de poussière. C'est le but du **projet de télescope sub-millimétrique en ballon, Pilot**.

Là encore, les grandes avancées seront, comme elles l'ont souvent été, conduites par les observations, les simulations numériques directes étant trop pauvres, tout en restant indispensables pour maîtriser certains problèmes bien limités. Les observatoires spatiaux

actuellement envisagés couvrent le grand domaine de longueurs d'ondes inaccessibles du sol, soit de 20 à 800 μm , qui est le plus adapté à l'étude de ce milieu froid. Les projets discutés dans le cadre de la prospective Cnes ont été **Respire**, et **H2X**. Seul H2X a été retenu sur le plan scientifique, mais le concept de cette mission devra être approfondi pour voir s'il peut rentrer dans le cadre d'une mission de type minisatellite en collaboration bilatérale. La Nasa étudie dans le cadre de ses deux programmes-phares *Structure and evolution of the Universe* et *Origins*, les satellites *AstroBiology Explorer* et à plus long terme, trois projets qui sont un relevé complet du ciel avec un télescope de 2 mètres cryogénique dans le domaine infrarouge lointain et submillimétrique, un télescope refroidi à 4 K, de 8 à 10 mètres segmenté (Safir) dans le domaine 15-600 μm , comportant un instrument imageur et de la détection cohérente à 10^6 , et deux projets d'interféromètres sur poutre de 40 mètres pour Spirit (deux télescopes de 3 mètres refroidis à 4 K) et libres pour Specs (trois télescopes refroidis de 4 mètres, avec des bases pouvant atteindre 4 km).

La formation des systèmes planétaires

Il y a une dizaine d'années, le thème des **exoplanètes** était un sujet réservé aux exercices de prospective à très long terme. Depuis, avec l'étude des disques proto-planétaires, des systèmes planétaires jeunes, des disques cométaires et surtout avec la découverte des premières exoplanètes au milieu des années 1990, le **contexte scientifique a complètement changé**. Découvertes par la méthode des vitesses radiales ou par celle des transits, **nous connaissons aujourd'hui plus d'une centaine d'exoplanètes**. À cela s'ajoute des dizaines de disques proto-planétaires et quelques disques planétaires ou cométaires. La détection des exoplanètes a révélé des systèmes avec des propriétés totalement inattendues : certaines planètes géantes appelées "Jupiter chauds" sont extrêmement proches de leur étoile, d'autres sont sur des orbites très excentriques. Il est désormais évident que la structure et les propriétés des systèmes planétaires sont intimement liées aux mécanismes de formation et d'évolution, mais ceux-ci restent encore mal compris.

Notons aussi que, avec les dispositifs actuels, un système planétaire similaire au système solaire reste indétectable. Une planète comme Jupiter est à la limite de détection, les planètes telluriques sont inaccessibles. En effet, **toutes les exoplanètes connues à ce jour**

ont été identifiées par des instruments au sol. Pour aller plus loin, il apparaît évident que les **prochaines étapes seront franchies avec des instruments spatiaux**. Deux grandeurs caractéristiques le démontrent clairement : les rapports de luminosité planète/étoile sont de l'ordre de 10^{-6} à 10^{-9} et les distances, ou plus exactement le rapport entre la taille des systèmes planétaires et la distance qui sépare les étoiles de la Galaxie, et par conséquent les séparations angulaires sont extrêmement petites : à 50 par secs, une planète située à 5 unités astronomiques de son étoile est vue sous un angle de 0,1 seconde d'angle.



Figure 3 : Première image d'un objet de taille d'une planète autour d'une étoile de type naine brune obtenue avec des techniques d'optique adaptative. Cette observation a été possible du fait que la naine brune a une très faible luminosité, ce qui rend le contraste entre l'étoile et sa planète faible. Pour des étoiles de type solaire, le contraste est beaucoup plus grand, ce qui rend l'observation de la planète très difficile. L'interférométrie dans l'espace sera le moyen privilégié pour permettre l'étude de ces exoplanètes.

© European southern observatory, 2004.

Déjà deux (ou trois) programmes importants menés par trois agences spatiales différentes seront lancés d'ici la fin de la décennie : en tête de proue, **Corot** (Cnes) lancé en 2005, puis **Kepler** (Nasa) en 2006 ou 2007, et peut-être **Eddington** (Esa) en 2009. Eddington bénéficiera directement du savoir-faire acquis avec Corot avec lequel il partage la spécificité d'aborder simultanément la recherche d'exoplanètes et l'astéro-sismologie. Ces trois missions auront pour objectif de chercher la signature photométrique des occultations d'étoiles lors des transits planétaires.

Avec une précision photométrique proche de un dix-millième, et la surveillance de plusieurs dizaines de milliers d'étoiles, Corot permet d'espérer la détection non seulement d'un très grand nombre de planètes géantes mais aussi de grosses planètes telluriques. Kepler et Eddington permettront de sonder la présence de planètes de la taille de la Terre autour de plusieurs centaines de milliers d'étoiles. Kepler se concentrera sur les étoiles de type solaire, alors qu'Eddington observera des étoiles de tous types spectraux.

Après ces missions, la prochaine décennie s'ouvrira avec **Gaia** (Esa) vers 2010. En plus de nombreux autres objectifs scientifiques, les performances astrométriques de Gaia permettront la détection systématique d'exoplanètes autour des étoiles du voisinage solaire plus brillantes que la magnitude limite de l'instrument ($V = 20$). La méthode astrométrique présente l'avantage sur la méthode par occultation de ne pas se limiter aux planètes dont l'orientation de l'orbite donne lieu à des transits.

Après la détection du plus grand nombre possible de systèmes planétaires autour de tous les types d'étoiles et l'observation de leur structure globale, on s'attachera à la caractérisation des propriétés individuelles des planètes. Pour cela, il faut être capable d'observer les photons venant directement des planètes et d'en effectuer la spectroscopie ou l'imagerie. Afin de séparer les photons des planètes de ceux de leur étoile, le développement de **coronographes** et **d'interféromètres puissants** est nécessaire. Pour l'imagerie, les techniques d'**hyper-télescope** avec densificateur de pupille apparaissent très prometteuses.

Les programmes **TPF** (Nasa) et **Darwin** (Esa) auront pour objectif de faire la spectroscopie de planètes, de préférence dans la "zone habitable". En effet, la spectroscopie dans l'infrarouge thermique permet de rechercher dans l'atmosphère des planètes des traces de monoxyde de carbone, d'eau et même d'ozone. La présence de molécules d'oxygène (O_2 et O_3) est considérée comme un excellent traceur des systèmes hors équilibre : c'est donc un indice de la présence de vie. Rappelons que parmi les planètes du système solaire, seule la Terre possède une atmosphère riche en oxygène alimentée par la photosynthèse d'organismes vivants ! Une mission précurseur, comme **Pégase** permettrait d'effectuer une analyse spectroscopique détaillée de l'atmosphère des "Jupiters" les plus

chauds, avant les grandes missions TPF et Darwin. De nouveaux défis devront être relevés : les défis liés au vol en formation et à l'observation avec des dispositifs complexes à de grandes distances de la Terre, aux points de Lagrange, voire dans le système solaire externe afin de minimiser les perturbations de la lumière zodiacale.

Enfin, les futures missions auront pour objectif d'observer toutes les pièces constitutives des systèmes planétaires et leurs interactions : les planètes, mais aussi les objets moins massifs mais non moins importants comme les comètes, les astéroïdes, les satellites de planètes, le gaz et les poussières interplanétaires. En effet, n'oublions pas qu'une fraction importante de l'eau terrestre est d'origine cométaire et que la Lune stabilise l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre et ses saisons.

Les questions relatives à l'existence et l'origine des autres systèmes planétaires, **la découverte de planètes habitables ou habitées constituent un objectif majeur de l'astrophysique du XXI^e siècle**. Mais ces sujets ne peuvent se réduire au seul domaine de l'astrophysique. Tous les développements se feront en interaction avec la géophysique, la biologie, voire les sciences de l'information et les sciences cognitives. Ils auront un impact pour la science dans son ensemble.

Les objets compacts : trous noirs et étoiles à neutrons

Les objets compacts, étoiles à neutrons ou trou noirs, sont, parce que la vitesse de chute libre est de l'ordre de la vitesse de la lumière, le siège privilégié de **phénomènes de haute énergie**. Il y a aujourd'hui de nombreuses confirmations de l'existence de trous noirs, aussi bien dans les noyaux actifs de galaxies que dans les binaires X et prouver leur existence n'est plus vraiment un enjeu. Par contre, de nombreuses questions essentielles restent encore sans réponse. Ainsi, **on ne comprend toujours pas les mécanismes physiques reliant l'accrétion et l'éjection** : de nombreux systèmes accrétants, objets compacts mais aussi étoiles jeunes, éjectent de la matière sous forme de vents ou de jets collimatés, laissant à penser qu'il pourrait y avoir une relation universelle entre accrétion et éjection. Des progrès très significatifs ont été faits récemment dans la compréhension des disques

d'accrétion et du mécanisme responsable de la chute de matière sur l'objet compact, avec la mise en évidence du rôle essentiel de l'instabilité magnétorotationnelle. Mais la perte de masse et sa focalisation restent toujours incomprises. Il faut cependant noter que tous les noyaux actifs de galaxies ne développent pas de jets signalés par une émission radio intense : il y a une dichotomie entre les systèmes situés dans des galaxies elliptiques, présentant des jets et sources radio et ceux qui, situés dans des galaxies spirales, n'émettent pas ou peu en radio. Enfin, la nature de l'écoulement de matière au voisinage de l'objet compact reste très mal comprise. Il semble que, au moins à faible taux d'accrétion, le disque laisse place à un écoulement à géométrie quasi-sphérique, très chaud et dilué, peu efficace pour convertir l'énergie gravitationnelle en rayonnement. Ceci expliquerait la très faible luminosité et le spectre dur des systèmes contenant un trou noir lorsque le taux d'accrétion est petit.

Certains noyaux actifs, les blazars, dont le jet pointe en notre direction, peuvent émettre au-delà du TeV, mettant ainsi en évidence des mécanismes d'accélération de particules particulièrement efficaces, sans doute dans des chocs ou des perturbations magnétiques réparties le long du jet. Mais ces mécanismes de Fermi supposent une pré-accélération des électrons qui n'est pas maîtrisée. Et il n'est pas impossible que les particules accélérées soient des hadrons, faisant ainsi des noyaux actifs un site de production de rayons cosmiques de très haute énergie.

La réponse à ces questions ne pourra provenir que de l'observation simultanée, multi-longueurs d'onde, de ces sources. Bien sûr, les **missions X et gamma joueront un rôle essentiel**. *Integral*, puis *Simbol-X* qui aura une sensibilité cent fois meilleure dans le domaine X dur pourront observer le domaine spectral dans lequel on attend l'émission du plasma très chaud au voisinage du trou noir. *Glast*, avec une sensibilité trente fois meilleure qu'*Egret* et une bonne résolution spatiale et spectrale, devrait observer des milliers de blazars. Utilisé conjointement avec des observatoires spatiaux X et des observatoires sol pour les très hautes énergies, il permettra de contraindre fortement les modèles de jet. Les missions X, XMM-Newton aujourd'hui, puis *Xeus* avec une sensibilité inégalée fourniront des diagnostics spectroscopiques précis des conditions physiques de l'environnement des objets compacts. Enfin, à un horizon lointain, une mission

d'interférométrie X pourra faire l'image du disque d'accrétion au voisinage immédiat du trou noir dans les noyaux actifs les plus proches et vérifier directement les prédictions de la relativité générale.

Les sursauts gamma

L'origine extra-galactique des sursauts gamma a pu être établie grâce à leur contrepartie dans les domaines X, optique et radio. Ce sont donc, pendant une très courte durée, les **sources du ciel les plus intenses connues**. Il est généralement admis qu'ils résultent de chocs internes ou terminaux de jets ultrarelativistes produits lors de la coalescence d'objets effondrés ou d'hypernovae, mais, à vrai dire, leur nature reste encore largement inconnue. Plusieurs modèles concurrents ont été proposés et il n'est pas du tout sûr qu'il n'y ait pas plusieurs types de sursauts. L'intérêt de leur étude est multiple : outre la physique de l'effondrement proprement dit, les sursauts gamma permettent de contraindre la formation d'étoiles massives dans des galaxies à des distances cosmologiques ainsi que l'environnement du sursaut et le milieu intergalactique traversés. Les progrès viendront de l'**observation plus fine à haute énergie**, par *Integral*, *Swift* et *Glast*, mais aussi et peut-être surtout de l'étude à toutes les longueurs d'ondes de ces sursauts et de la recherche de leur contrepartie prompte en optique, qui permettra de mieux contraindre les modèles et de localiser avec précision les sursauts dans leur galaxie hôte. Le projet de microsatellite *Eclair*, dont l'un des objectifs est la détection de la contrepartie optique avant la fin du sursaut, y compris pour les plus courts d'entre eux, permettra des avancées significatives.

La physique des systèmes astrophysiques

À l'origine, l'astronomie fut essentiellement une science descriptive. Les premiers observatoires spatiaux ont permis de découvrir un bestiaire complexe, allant des objets les plus ténus comme le gaz intra-amas, jusqu'aux objets les plus denses comme les étoiles à neutrons. Maintenant, cette phase d'inventaire a été effectuée sur presque la totalité du spectre électromagnétique, des gammas à la radio. La découverte de ces objets a été suivie très rapidement de modèles phénoménologiques

permettant de reproduire leurs propriétés principales. L'astrophysique actuelle dépasse ce cadre phénoménologique pour élaborer de vrais modèles fondés sur des processus physiques décrits dans leurs détails. Cet aspect de l'astrophysique est particulièrement marqué dans les études de la physique des galaxies et de la physique stellaire.

La physique des galaxies

À la fois lieu et moyen de la nucléosynthèse de l'essentiel des éléments chimiques plus lourds que l'hélium dans l'Univers, les galaxies apparaissent aujourd'hui comme des **systèmes complexes**, par la variété de leurs constituants et des processus astrophysiques qui les relient, et **ouverts**, car leur formation et leur évolution dépendent largement des échanges avec le milieu environnant.



Figure 4 : La galaxie spirale Messier 83. Les galaxies sont des ensembles allant de quelques millions à quelques dizaines de milliards d'étoiles, baignant dans un milieu interstellaire composé de gaz ionique, atomique et moléculaire et de poussières. L'évolution des galaxies est gouvernée par la manière dont elles transforment leur gaz interstellaire en étoiles et dont celles-ci enrichissent le milieu interstellaire à la fin de leur vie. Les mécanismes qui gouvernent ce cycle font appel à tous les domaines de la physique, avec des échelles spatiales et temporelles couvrant plusieurs ordres de grandeurs. La modélisation détaillée de ces objets, et de leur évolution reste à faire. Ces études doivent s'appuyer sur des observations dans toutes les longueurs d'onde, en particulier dans l'infrarouge, l'ultra-violet et les X, donc en provenance d'observatoires spatiaux.

©European Southern Observatory, 1999

La décennie précédente a vu la mise en service de plusieurs instruments de grande envergure au sol (SDSS, Keck, VLT, Megaprime) et dans l'espace (HST, Iso, Swas deep space 1, Fuse, Chandra, XMM, Spitzer). Ces instruments ont joué et jouent un rôle essentiel dans l'étude de la physique des galaxies et les résultats les plus récents corroborent le cadre général dit de formation hiérarchique des structures : **les galaxies se construisent au cours des fusions successives de halos de matière noire, qui créent des puits de potentiel dans lesquels s'accumulent les baryons**. Ceux-ci ne représentent que 10 % de la masse totale des galaxies. Les modèles actuels de formation et d'évolution des galaxies prennent en compte la pression du gaz, la production de métaux, le refroidissement radiatif et le chauffage, ainsi que la formation stellaire. Sauf pour l'évolution de la matière sombre généralement traitée par simulations numériques, les modèles font largement appel à des prescriptions phénoménologiques et rendent compte avec un certain succès des principales caractéristiques globales des galaxies : distribution des masses, luminosités, couleurs, morphologies, abondances.

On est cependant encore loin de pouvoir tracer en détail l'histoire de chacun des composants depuis le premier nuage proto-galactique, à partir de simulations physiques cohérentes et réalistes. En effet, si les principaux constituants des galaxies, hormis la matière noire, sont bien identifiés (populations stellaires : bulbe, disque, halo stellaire ; milieu interstellaire : gaz à différentes températures, poussière, halo de gaz chaud), l'évolution de ces constituants met en jeu des processus astrophysiques nombreux et complexes, dont on ne maîtrise pas l'ensemble des caractéristiques individuelles et moins encore leurs interactions et l'évolution globale : mécanismes de dissipation dans les baryons et évolution dynamique des galaxies, évolution chimique, formation des complexes moléculaires, formation stellaire et ses mécanismes de régulation, mécanismes de circulation du gaz dans la galaxie et le milieu intergalactique. Le plus surprenant reste que malgré la complexité des mécanismes en jeu, qui se déroulent sur des échelles spatiales et temporelles couvrant plusieurs ordres de grandeur, **les galaxies passent la plupart de leur évolution dans des états de quasi-équilibre, grâce à des mécanismes de contre-réactions encore mal compris**.

Longtemps négligées, on pense maintenant que les interactions d'une galaxie avec son environnement

sont déterminantes pour son évolution. **Les vents galactiques** sont responsables de l'enrichissement du milieu intergalactique, **les fusions** entre galaxies engendrent des flambées de formation d'étoiles, les interactions des galaxies entre elles à l'intérieur des **amas de galaxies** modifient leur morphologie et leur contenu gazeux. Mais le détail de ces processus reste encore à élaborer. Enfin, une question reste complètement ouverte, celle de **l'interaction entre une galaxie et le trou noir** qui se trouve en son centre. Lequel engendre l'autre ? les résultats récents d'XMM et de Chandra ont permis de démontrer l'existence d'une très importante population de quasars de faible excitation et très rougis à des *redshifts* plus grand que deux, ce qui confirme le rôle-clé de la phase quasar dans la formation des galaxies.

La compréhension de ces processus est le grand enjeu de la physique des galaxies pour les vingt années à venir et représente une clé essentielle pour relier les observations des galaxies lointaines à l'Univers local. Dans ce travail, qui fera appel à des instruments beaucoup plus complexes que ceux de la décennie précédente, la **Voie Lactée** et les **galaxies proches** sont des laboratoires privilégiés pour tester notre compréhension des mécanismes et étudier en grand détail la trace fossile actuelle des différentes étapes des processus de transformation. Un effort considérable, de modélisation d'une part, et d'investissements logiciels pour la manipulation des données d'autre part, devra être mené en parallèle à ces travaux d'observation. Les "**observatoires virtuels**" offrent un cadre très prometteur pour ce dernier point. Les progrès dans notre compréhension de la physique des galaxies seront liés à ceux obtenus dans notre connaissance des processus individuels, mais aussi à des observations bien ciblées qui permettront d'affiner notre connaissance globale de ces objets.

On peut citer :

- > L'évolution du **taux de fusion** de galaxies avec le *redshift* : Herschel, JWST ;
- > La **relation noyau central – galaxie** : Herschel, JWST et les observatoires X, Simbol-X et Xeus ;
- > L'**histoire des populations stellaires** et l'identification de traces fossiles d'accrétions dans notre Galaxie : Gaia ;
- > La **physico-chimie** du milieu interstellaire : Herschel, H₂X ;
- > La recherche de la **nature de la matière noire** : H₂X, JDEM, Dune.

L'évolution stellaire et la nucléosynthèse

Dans le contexte scientifique de ce début de XXI^e siècle, la physique stellaire joue un rôle prépondérant du fait de sa position privilégiée à l'interface de différents domaines astrophysiques. Cette thématique se trouve en effet à la croisée des chemins entre physique fondamentale, physique galactique et cosmologie, sans oublier son domaine de recherche propre.

En ce qui concerne la **physique fondamentale**, plusieurs domaines de l'astrophysique stellaire sont désormais accessibles aux expériences de laboratoire, comme les expériences de hautes pressions (fLaser Mégajoule) ou les expériences de turbulence et d'instabilité. Mentionnons également l'astrophysique du Soleil, à l'interface de la **climatologie** et de l'**environnement**, et celle des objets compacts (naines blanches, étoiles à neutrons, binaires compactes, novae et supernovae, trous noirs), à l'interface de la **physique des hautes énergies** (X ou gamma) et de la **physique des particules**.

De même, les interactions entre physique stellaire et galactique sont multiples. Le contenu baryonique des galaxies, ainsi que leur évolution chimique, est entièrement déterminé par la caractérisation des propriétés stellaires et substellaires. Sans elles, aucun modèle galactique fiable ne peut être élaboré. La détermination de la fonction de masse initiale, paramètre essentiel dans l'évolution galactique, nécessite une caractérisation précise des paramètres fondamentaux des étoiles. Des projets comme Gaia sont un exemple de cette complémentarité entre physique stellaire et implication galactique.

L'étude des étoiles et de leur environnement fait appel à des techniques d'observation très variées (photométrie, spectroscopie, polarimétrie, astrométrie, interférométrie, coronographie, sismologie, imagerie à haute résolution angulaire, imagerie grand champ, spectro-imagerie intégrale de champ, spectro-polarimétrie, etc.) et couvre l'ensemble du domaine spectral accessible (hautes énergies gamma et X, ultraviolet, visible et infrarouge, sub-millimétrique et millimétrique, radio centimétrique et décimétrique). Ceci nécessite évidemment la combinaison d'observations au sol et depuis l'espace. Dans ce contexte, les futures missions spatiales sont de première importance.

Après les **toutes premières phases de leur formation**, l'évolution des étoiles jeunes vers la séquence principale pose encore de nombreuses questions : champ magnétique et disque circumstellaire, rotation, multiplicité. Ce domaine de recherche devrait connaître une nouvelle impulsion grâce à la moisson de résultats attendus d'observatoires spatiaux en opération ou à venir (XMM, Spitzer, Herschel, JWST/Miri), alors qu'à l'interface avec la planétologie la découverte de nouveaux systèmes planétaires (Corot, Eddington, Gaia, Darwin) offrira des contraintes fortes sur l'évolution ultime des disques circumstellaires.

À l'autre extrême, l'étude des **phases ultimes** de l'évolution stellaire et de la nucléosynthèse pose de nombreux problèmes de physique fondamentale. Ces aspects, à l'interface avec la physique des hautes énergies, sont traités ailleurs dans le document. Dans ce domaine, les missions spatiales ont et auront un rôle premier plan (XMM-Newton, Integral, Glast, Max, H2X ou Simbol-X, Xeus).

L'évolution des étoiles est caractérisée par la richesse et la complexité des mécanismes physiques à l'œuvre. Grâce à l'**héliosismologie** et, en particulier, aux observations effectuées avec Soho, le Soleil est l'étoile la mieux comprise dans ses divers processus physiques. Les processus liés à la rotation ou au champ magnétique viennent d'apparaître dans les modèles stellaires. Une des prochaines étapes à franchir consistera, par exemple, à rendre compte des variabilités liées à l'évolution de la rotation interne et la compréhension de l'effet dynamo sur des échelles de quelques dizaines ou centaines d'années avec, comme conséquence, une représentation plus réaliste du Soleil dans des problématiques telles que l'interaction Soleil-Terre. Le soutien en modélisation de ce problème sera un accompagnement à de futurs projets en héliosismologie comme l'instrument Golf-NG, soit embarqué sur un microsatellite, soit comme passager d'une grande mission solaire.

Une révolution semblable à celle qu'a connue la physique solaire est attendue en physique stellaire, grâce à l'avènement de l'**astérosismologie spatiale** qui commencera avec **Corot**. L'astérosismologie est l'un des deux objectifs principaux de cette mission, avec la recherche d'exoplanètes. Corot permettra de détecter et mesurer les oscillations d'une centaine d'étoiles à travers le diagramme HR, dont certaines,

suivies pendant 150 jours environ, avec une précision de l'ordre de 0,1 μHz . Cette précision offrira la possibilité de sonder en détail la structure interne de ces étoiles, en particulier les régions situées à la base de la zone convective, ainsi que leur profil de rotation interne. Ce sondage, effectué sur un échantillon significatif d'étoiles de masses, d'âges, et de vitesses de rotation différents, permettra de placer des contraintes observationnelles majeures sur la description des processus de transport dans les intérieurs stellaires.

Eddington devrait reprendre les objectifs de Corot de manière plus ambitieuse et plus efficace. Ainsi, ce seront plusieurs dizaines de milliers d'étoiles de tous types, y compris des membres d'amas ouverts de différents âges et des étoiles de population II, qui seront observées dans le cadre du programme d'astérosismologie d'Eddington. C'est en quelque sorte une fenêtre qui s'ouvre sur les processus physiques des intérieurs stellaires, permettant de dépasser les limites imposées jusqu'ici par l'épaisseur optique de la photosphère.

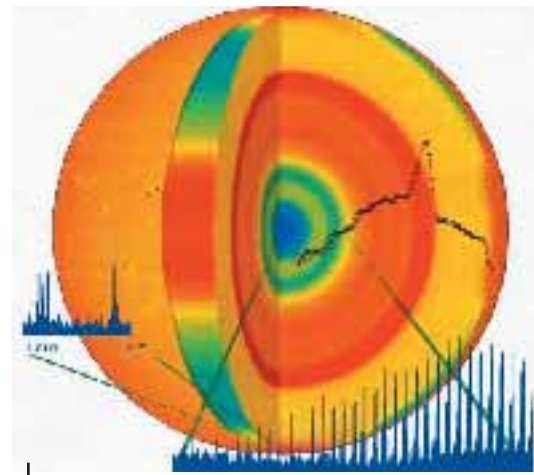


Figure 5a : Intérieur du soleil déterminé à partir des mesures d'héliosismologie avec Golf.

De nombreux problèmes-clés de l'astrophysique reposent sur la détermination des paramètres fondamentaux des étoiles (masses, rayons, compositions chimiques, rotation et parallaxes donnant accès à la luminosité). Les tests de modèles d'évolution chimique et dynamique de la Galaxie sont fondés sur des études statistiques impliquant les distances, coordonnées, mouvements propres, vitesses radiales et compositions chimiques d'un grand nombre



Figure 5b : Vue d'artiste du satellite Corot.

La sismologie est un outil privilégié pour étudier l'intérieur des étoiles. Jusqu'ici, cette technique n'a été vraiment employée que pour le Soleil, en particulier avec l'instrument Golf sur le satellite Soho. La mesure des modes d'oscillations de basses fréquences qui se propagent très à l'intérieur du Soleil permettent d'obtenir des contraintes directes sur les régions centrales : densité, pression, rotation, etc. Ce type de mesure sera bientôt étendu aux étoiles de tous types, grâce à la mission Corot, lancée par le Cnes à la mi-2006. Corot a deux buts principaux : l'astérosismologie et la détection d'exoplanètes par la méthode de transit de la planète devant l'étoile.

©Cnes

d'étoiles de tous âges. Les paramètres stellaires interviennent aussi en cosmologie par l'étude des éléments primordiaux produits par le Big Bang, par l'établissement de l'échelle de distance extra galactique grâce à la connaissance de la luminosité d'étoiles variables, et par la datation des plus vieilles étoiles. Ainsi, l'impact de ces paramètres dépasse largement les limites de la communauté stellaire, favorisant l'interaction avec les autres structures thématiques. Dans ce contexte, la communauté stellaire se prépare à l'exploitation optimale des retombées de la mission Gaia.

L'utilisation des milieux astrophysiques comme laboratoire

Les différents milieux que l'on trouve dans l'Univers fournissent un ensemble sans équivalent de conditions physiques. **C'est dans le ciel qu'on trouve les milieux les plus froids, les plus chauds, les plus denses, les**

moins denses. L'astrophysique permet d'exploiter au mieux ce laboratoire exceptionnel pour tester les théories physiques dans des conditions que l'on ne peut pas produire dans les laboratoires classiques.

La physique des très hautes énergies

La détection de **particules accélérées à des énergies supérieures au Joule pose de nombreuses questions, à l'astrophysicien comme au physicien des particules.** Quels sont les sites d'accélération ? Comment rendre compte du spectre en énergie qui ne semble pas indiquer de coupure au-delà de 10^{19} eV, lorsque le libre parcours des protons devient inférieur à la dizaine de Mpc en raison de leur interaction avec les photons du corps noir cosmologique (coupure Gzk) ? A-t-on là des indications d'une nouvelle physique (défauts topologiques ou particules massives vestiges de l'Univers primordial) ? L'observatoire **Auger** apportera un début de réponse à certaines de ces questions, mais une mission comme **Euso** pourrait être nécessaire pour accroître la surface effective de détection et accéder aux énergies les plus élevées si Auger confirme l'existence de particules au-delà de la coupure Gzk. Parallèlement, l'observation de sites possibles de production par **Glast** sera indispensable pour caractériser les mécanismes d'accélération. Glast permettra par ailleurs, en complément avec des observatoires au sol à plus haute énergie, la recherche de particules supersymétriques, candidats possibles pour la matière noire. Celles-ci, concentrées dans certaines régions (centre de la Galaxie, amas globulaires, etc.) sont leurs propres antiparticules et pourraient être détectées par leur annihilation qui produit ultimement des photons gamma.

La physique des ondes gravitationnelles

L'ouverture d'une nouvelle fenêtre sur l'Univers par les détecteurs d'ondes gravitationnelles, outre son intérêt pour la physique fondamentale, aura un impact considérable sur notre façon d'aborder l'étude des objets compacts. Les détecteurs au sol sont limités aux hautes fréquences et ne pourront détecter que des événements tels que la coalescence d'objets compacts de masse stellaire ou les explosions de supernovae. **Les détecteurs spatiaux, comme Lisa, donnent accès aux basses fréquences et permettront d'accéder à un grand nombre de sources,** comme les variables cataclysmiques, les noyaux actifs de galaxies, et peut être de mesurer les ondes gravitationnelles d'origine cosmologique.

La physique des milieux dilués

Le milieu interstellaire offre des conditions tout à fait particulières pour l'étude de la physico-chimie des milieux très peu denses. C'est un domaine pluridisciplinaire qui s'est largement développé ces dernières années. L'étude des molécules interstellaires se fait surtout en radio millimétrique du sol, à l'exception de l'étude de la vapeur d'eau qui ne peut se faire qu'au-delà de l'atmosphère terrestre. L'étude des poussières interstellaires sur toute l'étendue de leur spectre de masse se fait essentiellement depuis l'espace grâce aux observatoires en infrarouge. **Herschel** et **Planck** devraient contribuer à l'étude du milieu interstellaire dans notre galaxie et dans les galaxies proches. Le relais devrait être pris par des missions dédiées à des molécules particulières, comme **H₂** avec **H₂X**, et des observatoires de plus grandes tailles, comme le projet **Safir** de télescope refroidi de 10 m de diamètre. Le ballon **Archeops** a mis en évidence une émission polarisée des poussières galactiques, bien au-delà de ce que laissait prévoir les modèles de poussières. Une nouvelle mission ballon, **Pilot**, pourrait permettre de mieux comprendre ce phénomène.

L'astrochimie organique et l'exobiologie

L'exobiologie se fait principalement grâce aux sondes planétaires vers Mars. Mais on trouve aussi dans le milieu interstellaire de très nombreuses molécules organiques, dont l'étude peut se révéler précieuse pour comprendre comment peuvent se former les molécules prébiotiques. Il y a plusieurs projets en ce sens proposés pour des missions de type Explorer à la Nasa, auxquelles des équipes françaises pourraient se joindre en tant que scientifiques associés.

Priorités programmatiques

Le programme scientifique de l'Esa

Le programme scientifique de l'Agence spatiale européenne est seul moyen d'avoir accès à des grands observatoires spatiaux indispensables pour progresser dans les observations astrophysiques. **L'espace est indispensable pour obtenir une couverture complète du spectre électromagnétique.** Même dans le visible, l'espace permet des observations à grand champ qui

sont impossibles du sol. Les vingt dernières années ont vu de nombreuses missions dans tous les domaines de longueurs d'ondes. Pour faire de nouveaux progrès, il faut obtenir **des gains en sensibilité et en résolution spatiale**. Ceci ne peut être obtenu qu'en augmentant la taille des télescopes. Un domaine de longueur d'onde n'est pas spécifique d'une thématique scientifique : l'infrarouge sert tout autant à étudier l'évolution des galaxies que la formation des étoiles, les X sont nécessaires autant pour les noyaux actifs de galaxies que pour les étoiles. Tout ceci fait que l'astrophysique a besoin **d'observatoires spatiaux banalisés**. La taille et le coût de tels observatoires sont tels qu'ils ne peuvent être entrepris qu'au niveau européen, voire mondial. Il y a évidemment aussi une place pour des missions spécialisées qui peuvent être menées à bien dans un cadre national ou bilatéral, mais l'accès à de grands observatoires spatiaux reste la première priorité des astrophysiciens. Cet intérêt s'est manifesté par le grand nombre de propositions envoyées à l'Esa en réponse à l'appel *Cosmic vision*. La communauté française a été particulièrement impliquée dans ces réponses. Non comprises les propositions Soleil et système solaire, il y a eu 43 propositions en astrophysique, 18 d'entre-elles venaient de groupes incluant des français, et 10 comportent des PI français.

Le groupe astrophysique réaffirme donc fortement son **soutien à la poursuite d'un programme spatial ambitieux à l'Esa**. Il recommande une forte implication scientifique dans les missions déjà sélectionnées, Gaia et Lisa et éventuellement Eddington, s'il voit le jour. Il soutient aussi une participation active au programme *Cosmic vision* de l'Esa, incluant dans un premier temps des R&D et des analyses de missions qui permettront aux équipes françaises de se placer en bonne position dans les futurs projets de l'Esa.

Parallèlement au soutien direct apporté au programme scientifique de l'Esa, le Cnes a soutenu une participation des équipes françaises aux instruments de ces observatoires, et à leur exploitation scientifique. Il y a des réflexions en cours pour que **l'Esa prenne une plus grande responsabilité pour les charges utiles**, en augmentant sa participation à la réalisation des instruments. Mais même avec une telle évolution, **le rôle du Cnes reste essentiel pour toutes les phases amont (R&T, phase 0) et aval d'exploitation scientifique**. Le soutien du Cnes au cours de ces phases est essentiel pour maintenir le très bon niveau des équipes françaises.

Il vient compléter de manière très efficace le support provenant des autres organismes : CNRS, observatoires, CEA, universités. Le groupe astrophysique recommande un renforcement du support scientifique apporté par le Cnes à l'exploitation scientifique des missions spatiales en général et Esa en particulier.

Projets de vol en formation

Le vol en formation est d'un grand intérêt pour les missions spatiales en astrophysique. C'est la **voie obligée** pour des observations de type **interférométrie**, qui sont les seules à permettre l'obtention des résolutions spatiales nécessaires pour l'observation des exoplanètes, ou des noyaux actifs de galaxies. C'est aussi la seule manière d'augmenter la longueur focale des télescopes, ouvrant ainsi un accès à de réels instruments d'imagerie à haute énergie. Pour s'en convaincre, il suffit de regarder le nombre de projets reposant sur le vol en formation dans les prospectives en sciences de l'Univers aussi bien à l'Esa qu'à la Nasa. Dans le cadre Cnes, il y a eu des propositions de missions vol en formation dès le premier appel à idées en 2001.

Les idées reçues en réponse à l'appel d'offres du Cnes sur le vol en formation couvrent un très large spectre, allant d'idées très prospectives à des missions réalisables à l'horizon 2010. Mais aucune d'entre elles ne peut se passer d'études préliminaires avant même de rentrer dans une phase A. Le groupe astrophysique propose donc un processus de décision par étapes :

- Sélection de projet pour des phases 0 : maintenant.
- Sélection de deux projets pour des phases A : été 2005.
- Sélection d'un projet à réaliser à partir de 2007 : fin 2006.

Luciola

Les techniques proposées sont très originales et novatrices. À terme, les concepts d'**hypertélescopes** sont probablement les seuls permettant d'atteindre des objectifs aussi ambitieux que l'imagerie d'exoplanètes telluriques ou celle de noyaux actifs de galaxies. Au stade actuel, elles ne permettent pas d'aboutir à un projet dans le cadre du présent exercice. Au vu de l'intérêt de ce concept, le **groupe astrophysique recommande la poursuite des R&T sur ces concepts**

d'hypertélescope et de voiles solaires. Il recommande également que soit mise en place une véritable équipe scientifique et technique, avec l'aide du Cnes, pour aboutir à un concept viable pour un projet à l'horizon 2020.

Imageur de Fresnel

L'idée complètement nouvelle présentée dans cette proposition est apparue très séduisante. Les performances réelles de ce concept restent à évoluer pour élaborer le projet. Le calendrier d'un tel projet sort du cadre de l'exercice de prospective actuel, mais les auteurs sont encouragés à poursuivre les études pour valider le concept d'un imageur Fresnel. Il apparaît aussi nécessaire de cibler les objectifs scientifiques pour permettre une étude de concept instrumental utilisant cette technique. Deux priorités sont apparues lors des discussions : l'infrarouge thermique et surtout l'ultra-violet. Ce travail devra être mené principalement dans le laboratoire avec un renforcement de l'équipe actuelle, par exemple avec un thésard, ou mieux un ingénieur de recherche. Les auteurs sont aussi encouragés à breveter le concept.

Paris

Ce concept d'**interféromètre radio basse fréquence** avait déjà été proposé à l'Esa dans une configuration à seize télescopes. La configuration proposée ici, à deux télescopes seulement, n'a pas paru intéressante scientifiquement. La difficulté principale de ce projet réduit réside dans le temps nécessaire pour effectuer des cartographies en faisant tourner la ligne de base, qui est très supérieur aux temps caractéristiques des phénomènes variables, observables avec cette technique comme les sursauts solaires ou stellaires. Le groupe a aussi noté l'absence d'une équipe scientifique forte autour du projet, qui serait nécessaire pour optimiser les programmes scientifiques. Il aurait été utile de clarifier les programmes d'observations des galaxies, et les gains apportés par Paris relativement à Lofar. Les très faibles contraintes de positionnement et d'orientation ne peuvent justifier Paris en démonstrateur de vol en formation.

Interféromètre hétérodyne sub-millimétrique

Le concept d'un tel instrument a été discuté aux États-Unis avec les projets Spirit et Specs. Il a aussi fait l'objet de l'une des recommandations d'un *workshop* européen qui s'est tenu à Madrid à l'automne 2003.

Par son ampleur et les développements techniques nécessaires pour le mener à bien, ce projet sort d'un exercice de prospective Cnes. C'est une idée qui devra être discutée lors de l'élaboration du programme *Cosmic vision* 2015-2025 de l'Esa.

Pégase

Ce projet s'inscrit directement dans une phase de **préparation de la mission Darwin**, dont il constitue une version très simplifiée à **deux télescopes et trois satellites**. Les programmes scientifiques possibles avec cette mission couvrent deux domaines : l'étude des atmosphères des exoplanètes de type Jupiter chauds et celles des naines brunes dans des systèmes binaires. Plusieurs niveaux de complexité ont été présentés dans la proposition, permettant des programmes d'intérêts scientifiques croissants. Les performances techniques nécessaires sont ambitieuses, même dans la version de base. L'évaluation technique effectuée par le Cnes montre qu'il n'y a pas d'impossibilités techniques identifiées, même si ce projet est sans doute à la limite de ce qui peut être entrepris dans un cadre national. Une phase 0, assez détaillée devrait permettre de mieux définir la mission. Plusieurs possibilités de simplifications techniques existent, mais leur impact scientifique n'a pas été encore analysé en détail. En particulier, le groupe astrophysique demande qu'une étude soit conduite sur les objectifs scientifiques possibles si seul le mode en mesure de visibilité était disponible et si on limitait le domaine spectral à une bande 0,6 – 3 microns. Enfin l'articulation de ce projet avec la mission Darwin devra être mieux cernée, surtout si l'Esa opte pour une solution moins ambitieuse, mais plus rapide de Darwin (Figure 6b).

Simbol-X

Cette mission avait déjà été retenue lors du premier exercice de prospective. Rappelons que l'objectif de cette mission est de permettre **l'imagerie fine des phénomènes d'émission non thermique au delà de 10 keV**. L'utilisation dans le détecteur de deux systèmes permet d'obtenir simultanément des images de 1 keV à 60 keV. Les programmes scientifiques principaux sont l'étude des phénomènes d'accrétion-éjection sur les trous noirs, et la résolution du fond extra-galactique X qui pique à 30 keV. Une étude de concept a été effectuée par le Paso du Cnes, qui a conclu que cette mission était réalisable, avec les partenariats indiqués, en particulier avec l'Italie pour la fourniture des



miroirs, dans le cadre de l'exercice de prospective du Cnes. Certains points doivent néanmoins faire l'objet d'études pour finaliser la phase 0, comme une étude de la lumière et des particules parasites sur les détecteurs. Comme pour Pégase, l'articulation avec le grand projet Esa, Xeus, doit être revue en fonction des décisions qui seront prises dans le cadre du programme *Cosmic vision* de l'Esa (Figure 6c).

Max

Ce projet avait également été discuté lors du premier exercice de prospective. Depuis, l'analyse des données du vol ballon Claire a été effectuée, démontrant la faisabilité d'une lentille de Laue pour focaliser les rayons gamma. Les objectifs scientifiques ont été mieux ciblés pour aboutir à un concept de lentille à deux longueurs d'ondes centrées sur les raies du Cobalt à 847 keV détectables dans les supernovae de type Ia et celle d'annihilation à 511 keV. L'objectif prioritaire de Max est la **spectroscopie fine de supernovae de type Ia proches**. Des questions ont été posées sur la sensibilité effective de cet instrument pour ces mesures. Le nombre d'objets observables est faible, de l'ordre de quelques supernovae par ans (< 10), et ce nombre varie très rapidement en fonction de la sensibilité. Une diminution d'un facteur 5 de la sensibilité peut ramener ce nombre à 0. Une phase 0 devrait permettre de préciser les sensibilités espérées avec des marges réalistes, ainsi que d'étudier les problèmes mécaniques et thermiques liés à la lentille (Figure 6a).

Minifren

L'utilisation de lentille de Fresnel en gamma est une possibilité intéressante. Le groupe astrophysique n'a pas été convaincu qu'au stade actuel d'étude de ces lentilles la proposition d'installer une telle lentille en "parasite" sur une mission de vol en formation permettrait de faire des progrès significatifs dans cette technique. Il recommande aux proposants de poursuivre ces études, avec des expériences au sol, auprès d'accélérateurs ou de faisceaux synchrotron.

PerXeus

Le projet Xeus a été reconfiguré après la remise en cause de l'utilisation à long terme de l'ISS. Xeus est devenu maintenant une mission en L2, avec deux satellites, un satellite portant les miroirs et un autre les

instruments. L'utilisation d'un nouveau type de miroir de type micropores en verre, beaucoup plus léger que les miroirs métalliques type XMM, permettrait un gain de deux ordres de grandeur en masse par rapport aux miroirs conventionnels. Ces miroirs font l'objet de R&T et leurs performances réelles sont encore mal connues. Par son ampleur et par les délais prévisibles, ce projet sort clairement de la prospective Cnes et doit être poursuivi dans le cadre Esa.

Conclusions pour les propositions de vol en formation

À ce stade de la réflexion, en fonction de leurs intérêts scientifiques et de leur évaluation technique, le groupe considère que trois des propositions doivent être retenues pour des études de phases 0. Par ordre alphabétique, ce sont :

- > Max ;
- > Pégase ;
- > Simbol-X.

Deux parmi ces trois phases 0 devraient déboucher sur des phases A, pour une **sélection d'une mission à la fin 2006**.

Le groupe astrophysique souhaite aussi voir l'étude des hypertélescopes se poursuivre dans un cadre élargi, par rapport à l'équipe actuelle, pour aboutir à un concept viable qui pourrait aboutir à l'horizon 2020. Le concept des lentilles de Fresnel devrait être validé par un travail supplémentaire de laboratoire.



Figure 6a : Max. Une lentille de Laue focalise des rayons gammas sur un satellite situé à 85 m portant des détecteurs Germanium. Max permet principalement l'étude des raies gammas émises par les supernovae.

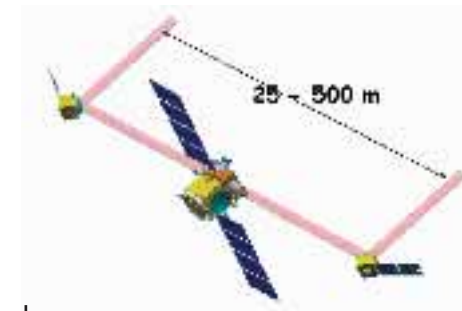


Figure 6b : Pégase. Un projet d'interféromètre à 2 télescopes fonctionnant dans l'infrarouge proche pour étudier les atmosphères des exoplanètes géantes très chaudes ("Jupiter chauds").



Figure 6c : Simbol-X. Un observatoire X fonctionnant dans un domaine d'énergie très étendu vers les hautes énergies par rapport à XMM. L'étude des trous noirs est le premier objectif de Simbol-X.

faciliter l'adéquation avec les contraintes d'un microsatellite. Les problèmes posés comme le choix de l'orbite sont du ressort d'une phase A normale.

Golf-NG

Ce projet d'héliosismologie par mesure des vitesses radiales avait déjà été examiné lors du premier exercice de prospective. Le but de cet instrument est la mesure très précise des modes d'oscillations de basse fréquence, plus particulièrement celle des modes de gravité. Ceux-ci étant les seuls à fournir des indications précises sur les régions internes du Soleil, avec des implications couvrant de nombreux domaines de la physique stellaire (émission de neutrinos, rotation, champ magnétique), mais aussi de la physique fondamentale en contraignant l'existence de particules exotiques. Les proposants ont clairement affiché une stratégie reposant sur une R&D permettant la réalisation d'un instrument démonstrateur au sol, suivi d'une mission satellite, soit microsatellite, soit passager sur une grande mission d'observation du Soleil. Le gain en sensibilité par rapport à l'instrument Golf sur Soho a été en partie démontré en comparant les sensibilités de Golf au tout début de la mission, et après l'arrêt du balayage en polarisation. Le groupe astrophysique recommande la poursuite de la phase de R&D et soutient le projet de microsatellite. En fonction des possibilités programmatiques, il soutient également le concept d'un instrument passager, si cela pouvait être réalisé plus rapidement qu'une mission microsatellite.

Le groupe astrophysique précise que le projet Picard n'a pas d'intérêt évident pour la connaissance interne du Soleil, et que, de son point de vue, il n'entre pas en compétition avec Golf-NG.

Microsatellites

Eclair

Ce projet (dédié à l'étude des gamma burst) avait été retenu dans le cadre du premier exercice de prospective. Il propose pour la première fois d'effectuer **l'imagerie simultanée des sursauts en optique, en X et en gamma**. C'est un renseignement fondamental pour la compréhension de ces phénomènes. Eclair sera le premier satellite à pouvoir faire de telles observations simultanées. Tous les autres, y compris le dernier, Swift, lancé en 2004 par la Nasa, doivent passer par un système complexe de transmission des coordonnées de l'événement à des télescopes robotisés au sol, ce qui entraîne la perte de l'observation du flash dans le visible. Depuis la première proposition, l'organisation du projet a été modifiée et le concept simplifié, ce qui devrait

Recommandation pour les microsatellites

Le groupe astrophysique a eu à examiner plusieurs projets de microsatellites. Ceci démontre qu'il y a un besoin pour des missions de cette classe, y compris en astrophysique, domaine demandeur de grands observatoires. Il souhaiterait voir repris un programme régulier de microsatellites avec des échéances et des processus de sélection bien établis. À ce stade de la prospective, le groupe astrophysique recommande la mise en phase A de deux microsatellites, avec les priorités suivantes :

- > Priorité 1 : Eclair,
- > Priorité 2 : Golf-NG.

Projets de satellite de classe intermédiaire

Bien que l'appel à idées ait été surtout dédié à une mission de vol en formation et aux microsatellites, nous avons aussi reçu des propositions de missions classiques, en particulier deux projets ayant pour but l'étude des modèles cosmologiques et de la physique associée après Planck.

Epic/Sampan et JDEM/Dune

Dans le précédent exercice de prospective, nous avons identifiés deux projets prioritaires en cosmologie.

Le premier consistait à la réalisation d'un **télescope imageur grand champ dans le visible et l'infrarouge proche**. Ce projet avait pour but de réaliser une étude systématique des supernovae de type Ia à grand *redshift*, ainsi qu'une cartographie détaillée de la distribution à grande échelle de la matière noire grâce à l'étude du cisaillement gravitationnel des images de galaxies lointaines. Ces deux types d'observations fournissent des méthodes indépendantes de mesure des paramètres cosmologiques, en particulier des paramètres décrivant l'énergie sombre. À l'époque, il avait été envisagé une participation à la mission Snap poussée aux États-Unis par la communauté de physique des particules. Depuis, ce type de projet est devenu l'une des composantes des missions *Einstein Probes* de la Nasa. Il s'appelle maintenant **JDEM** et sera financé à 75 % par la Nasa et à 25 % par le Département à l'Énergie. Un appel d'offres sera émis pour des candidats à la réalisation de ce projet. La participation française qui avait été proposée dans le cadre du projet Snap était un spectrographe intégral de champ pour effectuer la spectroscopie des supernovae détectées avec la caméra grand champ. Cette participation n'est plus du tout assurée dans le nouveau cadre de JDEM. De plus, le calendrier de JDEM, comme celui des autres missions *Einstein Probes*, a été repoussé à une date indéterminée, mais probablement postérieure à 2015, à la suite des nouvelles priorités définies par la Nasa. Dans ce contexte, il paraît opportun d'étudier la possibilité de réaliser dans un cadre européen à définir une mission moins ambitieuse que JDEM, mais réalisable avec un calendrier plus rapide de manière à "écrémer" le sujet. L'appel à idée *Cosmic vision* 2015-2025 de l'Esa offre un cadre naturel pour la poursuite d'un tel projet dans un cadre européen. Une telle mission, appelée **Dune**, a été proposée, à la fois dans le cadre de l'appel à idées du Cnes et celui de l'Esa.

Le deuxième consiste en une **mission pour mesurer les modes B dans la polarisation du fond diffus cosmologique**. Cette idée fait également partie des missions *Einstein Probes* et plusieurs groupes français sont associés au projet de mission **Epic** qui sera proposé à la Nasa dans ce cadre. Les problèmes de calendrier sont les mêmes que pour JDEM et, là aussi, un projet de petite mission européenne sur un calendrier rapide serait intéressant. C'est également un projet qui devrait être discuté dans le cadre de l'appel à idées *Cosmic vision* 2015-2025. Là encore, un projet appelé **Sampan** a été proposé au Cnes et à l'Esa. De plus, un important effort de R&D sur les matrices de bolomètres nécessaires pour ce type de projet doit être soutenu, afin de garantir une participation française à un bon niveau.

Dans les deux cas, le groupe astrophysique encourage la poursuite en parallèle des deux options : une participation à la grande mission américaine et l'étude d'une mission moins ambitieuse qui pourrait être réalisée dans un cadre européen à définir. Pour ce dernier cas, le groupe astrophysique souhaite que le Cnes aide les proposants à faire une phase 0 qui permettrait de mieux cibler l'ampleur de ces projets et leur contexte de réalisation. De manière pratique, le groupe astrophysique encourage les scientifiques qui participent à ces projets à s'organiser en groupes constitués pour préciser les objectifs scientifiques qu'ils assignent à ces missions rapides et à mandater deux ou trois personnes qui pourraient travailler en collaboration avec les équipes techniques du Cnes pour faire avancer les études de phase 0.

Recommandations pour les missions intermédiaires

Le groupe astrophysique soutient très fortement une participation à une mission cosmologique qui pourrait être réalisée dans un cadre national, bilatéral ou européen. Les deux concepts de missions proposées, **télescope pour l'imagerie grand champ et mesure de la polarisation du fond diffus cosmologique** doivent être étudiés plus en détail. Le groupe astrophysique recommande la mise en place d'équipes scientifiques et techniques, avec l'aide du Cnes, afin de mieux en préciser les caractéristiques pour aboutir soit à une mission faisable dans un contexte national, soit à un concept réalisable dans un contexte multilatéral ou européen. Ces études devront être initiées très rapidement pour permettre aux équipes française de bien se placer

dans les études similaires qui seront entreprises dans le cadre du projet *Cosmic vision* de l'Esa.

Missions sur l'ISS

Euso

Le projet Euso est un projet de **détection de rayonnement cosmique de très grande énergie** qui devait être installé sur la Station spatiale internationale vers 2010. Le projet était en phase A à l'Esa. Les incertitudes sur l'avenir de l'ISS à cet horizon rendent le contexte de ce projet difficile. Son financement pose également un problème s'il doit être soutenu par le programme scientifique de l'Esa et non plus par des fonds spéciaux de l'ISS. Enfin, il paraît nécessaire d'attendre les résultats d'Auger avant de conclure sur l'intérêt scientifique d'Euso. Avec toutes ces questions en tête, les groupes scientifiques de l'Esa ont donné un avis défavorable à la poursuite de ce projet. Il n'y a donc pas de raisons de soutenir ce projet au Cnes.

AMS

AMS est un projet de **mesure des particules chargées du rayonnement cosmique** qui devrait être installé sur l'ISS en 2007. Les mêmes incertitudes pèsent sur AMS, du fait de l'ISS que pour Euso. La proposition présentée consiste à l'installation d'un *trigger* pour la détection des particules neutres dans le calorimètre de cette expérience. C'est une demande modeste, qui sera revue dans le cadre normal des propositions d'expériences au Cnes. Cela n'entre pas dans l'exercice de prospective.

Missions d'opportunités

Le groupe astrophysique reste très attaché à garder une flexibilité importante dans la programmation générale, grâce à des participations minoritaires à des projets pilotés par d'autres agences. Les participations aux programmes **Fuse** et **Galex** fournissent un excellent retour scientifique en France, pour une participation financière réduite. Pour l'instant, ces missions ont été principalement des missions Nasa, mais on pourrait très bien imaginer des participations à des missions japonaises, chinoises ou russe.

Par définition, ces missions ne peuvent pas être planifiées à l'avance. Une enveloppe budgétaire doit rester disponible dans le plan de programmation pour en incorporer quelques-unes en fonction des nouvelles possibilités. Une certaine disponibilité des équipes techniques du Cnes doit aussi être possible pour bien définir les participations techniques françaises et en assurer le suivi programmatique.

Le groupe astrophysique a examiné deux demandes dans ce cadre.

H₂EX

Ce projet de **spectroscopie dans l'infrarouge thermique de la molécule H₂** dans le milieu interstellaire avait déjà été retenu dans la première phase de l'exercice de prospective. Un de points dur de ce projet reste le refroidissement du télescope sur une orbite basse. Une aide technique du Cnes serait nécessaire pour étudier la faisabilité de ce projet. Tel quel, il dépasse probablement le cadre d'un minisatellite Cnes de type Corot et des partenariats doivent être recherchés. L'étude technique du Cnes devrait aider les proposants à présenter leur projet dans d'autres contextes, comme *Cosmic vision* de l'Esa ou une mission Nasa. Les proposants sont encouragés à utiliser Spitzer pour valider tous les retours scientifiques qui sont attendus d'une mission comme H₂EX.

Missions UV

L'arrêt des missions de service du HST entraîne la perte d'une possibilité de spectroscopie UV profonde. Après Galex et Fuse et l'arrêt proche du 53, il n'y a plus de missions UV programmée à court ou moyen terme. **Le domaine UV est pourtant l'un des plus riches scientifiquement et ne peut être observé que depuis l'espace**. Par exemple, l'UV est le seul domaine permettant d'avoir un accès au milieu intergalactique chaud, qui reste un des seuls milieux possibles pour cacher de la matière baryonique. Le groupe astrophysique reconnaît cette situation regrettable. Il encourage les personnes intéressées par ce domaine à poursuivre des discussions dans un contexte européen, ou même plus large, pour aboutir à une participation de type Fuse ou Galex sur des projets émergents dans les autres agences. Dans ce cadre, le groupe astrophysique recommande la participation au projet de ballon **Fireball**.

Conclusions

En s'appuyant sur le travail de prospective effectué de manière plus générale par l'Insu, les programmes interdisciplinaires du CNRS et les sections concernées du Comité national, sur les idées émanant de la communauté en réponse aux appels d'offres du Cnes, et sur les évaluations techniques effectuées par les équipes du Cnes, le groupe astrophysique a établi une liste de projets prioritaires.

En premier lieu, le groupe astrophysique renouvelle le soutien au **programme scientifique en astronomie et en physique fondamentale mis en œuvre à l'Esa**. Les projets **Herschel**, **Planck**, **Gaia**, **Lisa**, pour ceux qui sont décidés, et plus tard des projets comme **Darwin** ou **Xeus** sont des projets prioritaires pour notre discipline, dans lesquels des équipes françaises sont très largement impliquées. Le groupe astrophysique rappelle que le soutien du Cnes aux activités d'exploitation scientifique de ces missions est essentiel, en plus de ce que fournissent déjà les autres acteurs scientifiques, CNRS, observatoires, CEA et universités.

Le **vol en formation** est une nécessité pour ouvrir de nouvelles possibilités en observations spatiales. L'augmentation des longueurs focales qu'il autorise, en déportant les détecteurs sur un autre satellite que celui portant le dispositif focalisant, ouvre de nombreuses perspectives pour les hautes énergies, mais aussi en coronographie. Le vol en formation permet également de recombinaison la lumière reçue par des télescopes séparés pour réaliser des interféromètres ou des hyper-télescopes. Parmi les nombreuses idées envoyées au Cnes, le groupe astrophysique en a identifié trois qui pourraient être réalisées dans un futur proche, avec une maîtrise d'œuvre Cnes. Il s'agit de **Max**, un observatoire gamma, dédié à l'étude des raies nucléaires émises par les supernovae de type Ia ; **Pégase**, un interféromètre à deux télescopes visible et infrarouge permettant une étude de l'atmosphère des exo-Jupiter chauds ; et **Simbol-X**, un observatoire en X dur permettant, grâce à ses capacités d'observations au-delà de 10 keV, des avancées importantes pour l'étude des trous noirs accrétants et des galaxies à noyaux actifs très rouges avec, en particulier, la résolution du fond diffus X dont le flux maximum se situe dans la bande de détection de Simbol-X.

Le groupe astrophysique recommande que ces trois projets fassent l'objet d'une phase 0, qui sera suivie par une phase A pour deux d'entre eux, amenant à une sélection d'une mission à la fin 2006, pour un vol en 2011-2012.

Le groupe astrophysique confirme son intérêt pour une participation à des projets de type microsattelites ont été identifiés. Deux qui pourraient faire l'objet d'une phase A, pour une sélection en 2006. Par ordre de priorité, ce sont **Eclair** un projet d'étude des gamma burst, et **Golf-NG**, un projet héliosismologique. Le groupe astrophysique souhaite une stabilisation du programme microsatellite, grâce à des sélections régulières.

Le groupe astrophysique a identifié deux types de projets liés à la **cosmologie**, auxquels il a accordé une très forte priorité scientifique. Il s'agit de **Sampan**, un projet de mesure de la polarisation du fond diffus cosmologique et de **Dune**, un projet d'imagerie du champ de déformation gravitationnel des galaxies lointaines. Ce type de projet est en discussion aux États-Unis, mais pour des projets très complexes. Des études scientifiques et techniques sont nécessaires pour savoir si des missions moins ambitieuses pourraient être réalisées en Europe, avec un calendrier plus court. Les équipes françaises, avec les connaissances acquises sur Planck pour Sampan, Megaprime et le CFHT-LS pour Dune, deviennent une des meilleures expertises scientifiques et techniques mondiales sur ces sujets. Le groupe astrophysique recommande la poursuite de ces études et la constitution d'une équipe projet, incluant des ingénieurs du Cnes, afin d'étudier les concepts possibles pour ces missions : projet principalement Cnes, bilatéral ou Esa.

Enfin, le groupe astrophysique est très attaché à maintenir une dose de **flexibilité dans la programmation Cnes** en laissant de la place pour des participations minoritaires à des projets poussés par d'autres agences : Nasa, Japon, Chine, etc. De telles missions d'opportunité permettent en général d'avoir un très bon retour scientifique pour un coût minime. De la même manière, le groupe astrophysique soutient deux projets de ballons : **Fireball** en UV et **Pilot** en sub-millimétrique.

Soleil, héliosphère, magnétosphère > par Philippe Louarn*



© Stéphane Lévin

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.

Les aspects scientifiques

L'état scientifique des domaines SHM a été discuté de manière approfondie lors d'une séance spécifique du groupe tenue le 7 avril 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.

*Centre d'étude spatiale des rayonnements.

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 dans 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, qui est démontrée à chaque nouvelle exploration** d'objets ou d'environnements du système solaire.

C'est sur cette base scientifique, laquelle 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*.

Quelques découvertes et résultats récents

Nous énonçons ici une série de découvertes factuelles de la dernière décennie, qui 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

La **rotation** rigide du Soleil le plus interne apparaît plus lente que celle des régions externes à certaines latitudes. Le rôle de la tachocline est reconnu dans les processus dynamo et la régulation des cycles. La circulation convective méridienne est montrée. L'image d'un intérieur solaire extrêmement structuré, où la dynamique de fines couches s'avère fondamentale, s'impose aujourd'hui (Figure 1).

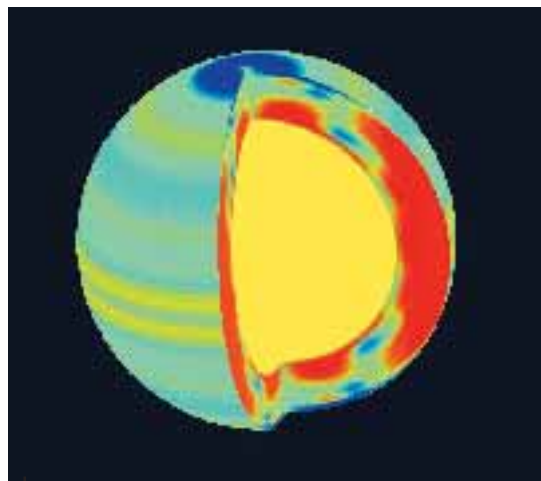


Figure 1 : Vue tri-dimensionnelle des écarts de vitesse dans les couches internes du Soleil et à sa surface. Des "jets" dans les régions polaires, la présence d'une couche de fort cisaillement (tachocline, vers 0,7 Rs) et la structuration en latitude de la rotation sont bien apparentes. Ces mesures sont obtenues par les techniques d'héliosismologie et les instruments de Soho.

En combinant la physique solaire et la physique des particules, on aboutit à la validation du modèle de la machinerie solaire interne et on met en évidence des oscillations du neutrino et, donc, de sa masse éventuelle.

Les différents modes du **vent solaire** (rapide et lent) et leur lien avec l'activité solaire et des structures photosphériques particulières est décrit. L'importance de la reconnexion aux différentes échelles dans le chauffage coronal est soulignée. Les ondes de Moreton, précurseur des CME, sont décrites.

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

Des écarts de la couronne par rapport au modèle magnéto-hydrodynamique traditionnel ont été mis en évidence. Les températures anisotropes et dépendant de l'espèce des particules, indiquent un rôle des ondes cyclotroniques dans le chauffage de la couronne.

Des écoulements systématiques vers le haut ont été identifiés 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.

L'observation systématique des **éjections de masse** (*Coronal mass ejection*, CME) et des phénomènes associés dans la basse couronne a fait des progrès significatifs, notamment en ce qui concerne les 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.

La présence systématique de populations non thermiques de particules dans le vent solaire et de processus explosifs d'accélération de particules dans la couronne a été observée, 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**

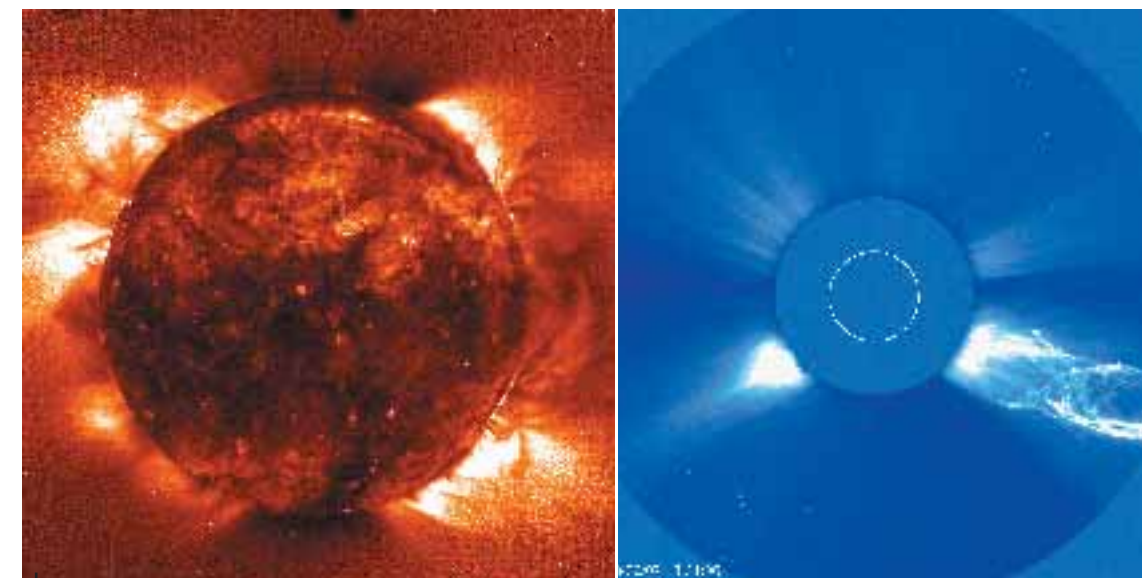


Figure 2 : Images obtenues par les instruments de Soho montrant la complexité topologique des champs magnétiques coronaux ainsi qu'un exemple d'éjection de masse coronale. Dans ce dernier cas, l'organisation hélicoïdale du champ est très visible.

vision dynamique à toutes les échelles observables.

Les mécanismes d'accélération du Soleil éruptif sont très divers et extraordinairement efficaces. Or 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 terrestre et planétaires

Les échelles physiques des chocs dans les plasmas sans collision ont été identifiées.

- 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 grandes 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*).

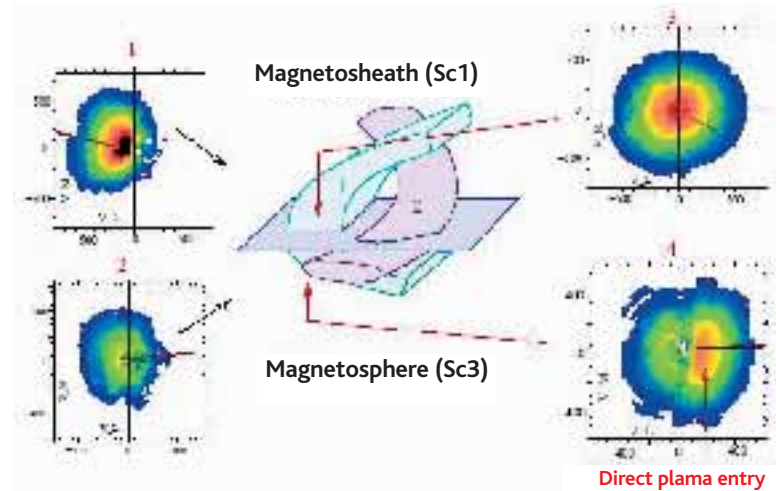


Figure 3 : Exemple de relation "micro/macro" physique étudiée grâce à Cluster. Seule la présence simultanée des quatre satellites de Cluster permet de reconstruire la configuration magnétique "entrelacée", résultant vraisemblablement d'une reconnexion, montrée au centre de la figure. Dans le même temps, 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).

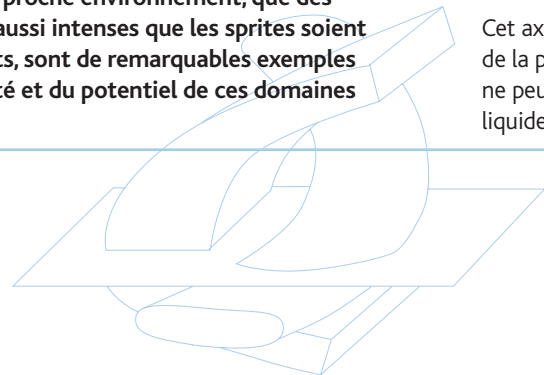
La dernière génération de satellites magnétosphériques ouvre effectivement des perspectives entièrement nouvelles d'analyses de la dynamique des plasmas spatiaux. Topologie 3D et structuration microscopique en sont des éléments fondamentaux (Figure 3).

Les premières applications de l'imagerie neutre ont vu le jour. Galiléo a permis de découvrir de nouveaux cycles d'activité concernant Jupiter, liés à des relaxations rapides d'énergie de rotation dans la magnétosphère.

- Interactions entre magnétosphère/satellites.
- La première magnétosphère propre d'un satellite. Ganymède a été découverte. Les environnements planétaires sont des terrains privilégiés d'études de phénomènes et de processus nouveaux.

Ionosphère, thermosphère et 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_x, 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 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 Galiléo, les premiers résultats Mars Express 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 Mars Express, la réalité de l'érosion de l'atmosphère martienne due à l'action du vent solaire commence à être quantifiée.

Les grands axes SHM

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

Axe 1 : interactions "inter-échelles", 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 :

- > 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 centraux dans tous les mécanismes d'accélération et de chauffage des particules.

- > 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 d'interactions ondes/particules plus ou moins cohérentes. 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.
- > 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.

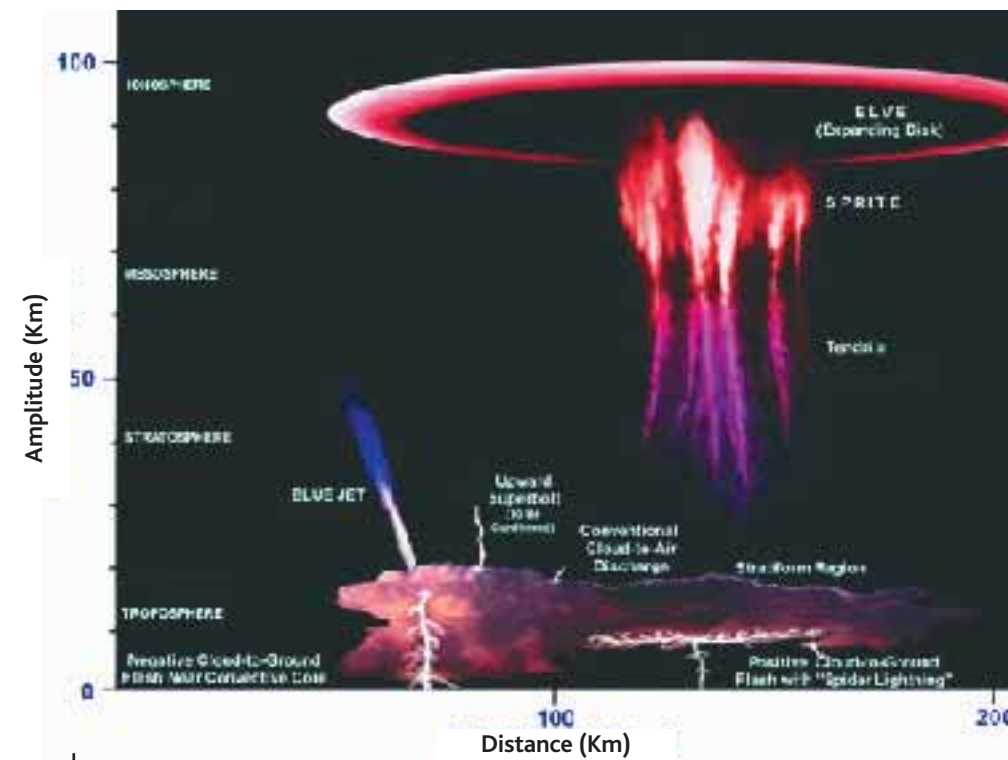


Figure 4 : Vue recomposée des phénomènes se développant aux interfaces atmosphère/thermosphère/ionosphère, au-dessus des systèmes orageux (sprites, elfes).

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 "macrophysique", 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-échelles 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/chimiques sous-jacents, **est démontrée 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.

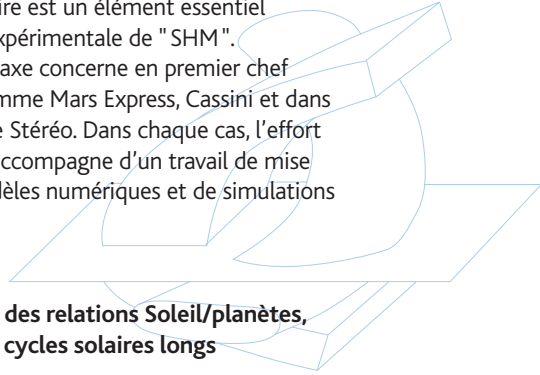
Axe 2 : L'analyse et la compréhension des interactions inter-couches des environnements du système solaire, en premier chef de la Terre et du Soleil mais aussi des planètes, est un axe fondamental de la prospective SHM. Cet axe rejoint les préoccupations de "météo de l'espace".

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 Mars Express, Cassini et dans un avenir proche Stéréo. 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 à l'évidence les effets solaires ne sont qu'un des nombreux facteurs affectant les environnements.

Axe 3 : Les évolutions à 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.



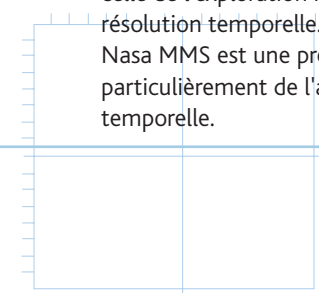
La stratégie expérimentale SHM doit prendre en compte la dimension à long terme des interactions Soleil/Terre et Soleil/planètes. Cela justifie un aspect "surveillance" des expériences.

Éléments 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, etc.) 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-satellites 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-échelles et à haute résolution temporelle. Après Cluster, le projet de la Nasa MMS est une première réponse qui traite plus particulièrement de l'aspect haute résolution temporelle.



La notion d'exploration multi-échelles a suscité des réponses au **Call for Themes** de l'Esa et le *Solar system working group* (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 de 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.

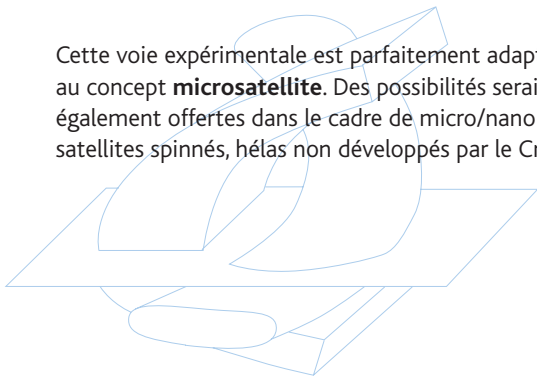
La notion d'exploration du système solaire externe, incluant l'étude de l'environnement de Jupiter et des frontières héliosphériques, est aussi un des thèmes prioritaires exprimés par le SSWG pour le programme *Cosmic vision*.

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", envisageables 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 ou encore l'étude des relations "Soleil/planète" concernant des objets proches (Axe 3).

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



Répartition thématique :

> Soleil intérieur et couches externes, vent solaire :	
Eruptions IR, Golf-NG, Lyot, Halfa, Vigiwind	microsatellite Cnes
Aspics	vol en formation
Héraklès, Safari, Helix, Sonde Solaire	Nasa
Solar Orbiter	Esa
> Planétologie :	
Vénus Express, Bepi-Colombo	Esa
Jimo, Juno	Nasa
> Magnétosphère, plasmas spatiaux :	
RBM, Sentinelle, Spoc	micro spinné
Storms, Imedia, Héraklès	constellations
MMS	Nasa
> Environnement terrestre :	
Isis	vol en formation
Taranis, LSO	microsatellite, petite expérience
> Interférométrie BF :	
Paris, Expri	vol en formation et petite expérience

Aspects programmatiques

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

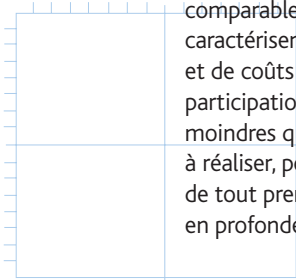
- > Vol en Formation (3 projets) : **Aspics, Isis, Paris**
- > Microsatellites Cnes (6 projets) : **Eruptions IR** (ex Mirage), **Golf-NG, Lyot, Halfa, Taranis, Vigiwind**
- > Microsatellites Spinnés (3 projets) : **RBM, Sentinelle, Spoc**
- > Mission de type "constellation" (3 projets) : **Storms, Imedia, Héraklès**
- > Participation à des missions d'opportunité (essentiellement Nasa) (5 projets, au moins) : **Résonance, Safari, Helix, Sonde Solaire, 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** (microsatellite Cnes), **Bepi-Colombo** et **Solar Orbiter** (Esa), **Stéréo** et **MMS** (Nasa) ; les participations aux projets planétologie : **Mars Express, Vénus Express** et **Cassini** ; l'exploitation actuelle des projets phares de SHM **Cluster** et **Soho**.

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 **microsatellite** 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 équivalentes 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 (Solar O, Solar P), le retour aux planètes géantes (Jimo, Juno) et l'analyse multipoints du milieu spatial (vol en constellation).
- 3) Les missions d'opportunité, solaires, magnétosphériques et planétologiques, jouent un rôle crucial pour SHM. Les charges utiles SHM, comparables 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 millions d'euros, 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 nanosatellites** (gamme < 100 kg). Envisagée sous la forme de



constellations, 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 R&T 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 les notions de vol en formation et de 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 coronagraphie Aspics se distingue de ce point de vue. La science *in situ* n'a pas proposé de mission reposant sur un vol en formation.

Évaluation programmatique et recommandations

L'évaluation a visé essentiellement la définition des priorités concernant le vol en formation et les microsatellites 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.

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 coronagraphie 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, 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 de vol en formation. À 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 entre les satellites de l'ordre de 100 mètres, avec une précision de quelques 10 centimètres en direction longitudinale et du millimètre en direction transverse. D'un point de vue scientifique, il permettra l'analyse des couplages "inter-couches" 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, à l'intérieur d'un budget correspondant à la partie basse de la fourchette envisagée.

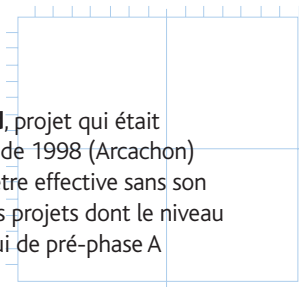
Microsatellites

Nous dissocions 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 de microsatellites

(R3) : Les filières micro et minisatellites 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



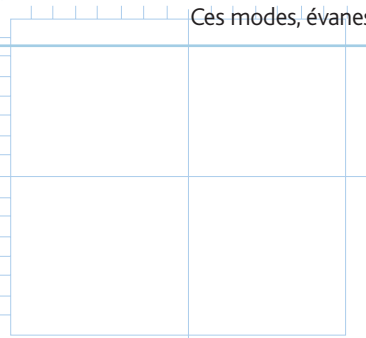
réel des grandes agences (Esa). Elle offre des opportunités d'études originales, très ciblées et permettant des premières scientifiques de niveau mondial. **Nous insistons sur la diversité et la richesse scientifique des propositions microsatellites qui nous sont parvenues. Elles sont des preuves de 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 microsatellite 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- α 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 à 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 deux microsatellites :

- (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- α . 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 infrarouge 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 Orbiter.

Les lancements de ces satellites devraient intervenir **dans un créneau 2008-2011**, en particulier pour des opérations lors du prochain maximum solaire ou peu de temps après.

Concernant la proposition d'héliosismologie **Golf-NG**, 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.

Golf-NG 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, c'est-à-dire 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 et intrinsèque au fort niveau de bruit turbulent du Soleil dans les gammes de fréquences concernées. Pour tenter de réduire ce bruit, Golf-NG est un spectromètre à résonance de nouvelle génération, reposant sur une analyse multipoints des flancs de la raie du sodium (15 points prévues pour Golf-NG au lieu de deux effectifs 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 R&T 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. Ces tests devraient s'accompagner d'un effort de modélisation de l'instrument et de la technique d'analyse proposée.

Programme Esa

Le groupe a pris connaissance des dernières recommandations du *Space science advisory committee* (réunion du 19/05/2004). Il se félicite de la prise en compte officielle de **Solar Orbiter** dans le programme scientifique obligatoire, avec un lancement préconisé pour 2013, suivant donc **Bepi-Colombo** 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 missions 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'*European geosciences union* (Vienne 2005). La communauté solaire a également répondu à cet appel de l'Esa, avec en particulier la proposition Hélios qui préconise une stratégie complète d'étude à distance et *in situ* du Soleil et de 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.

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 consortiums ont été sélectionnés pour une phase A approfondie, chacun comportant des équipes françaises.

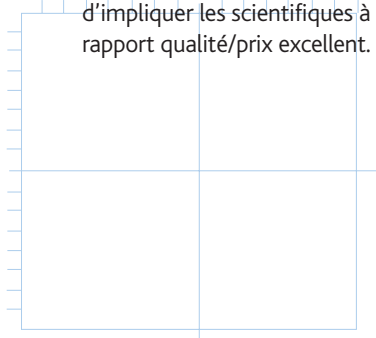
Même si aujourd'hui toute contribution au *hardware* de **SDO** est exclue, ce projet est une mission d'opportunité tout à fait fondamentale pour la communauté solaire. **Les implications au niveau de l'acquisition des données de SDO et à leur exploitation doivent absolument être soutenues par le Cnes.**

Le groupe suit avec la plus grande attention le redémarrage du projet **Solar Probe** 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 million d'euros), 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 R&T 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.

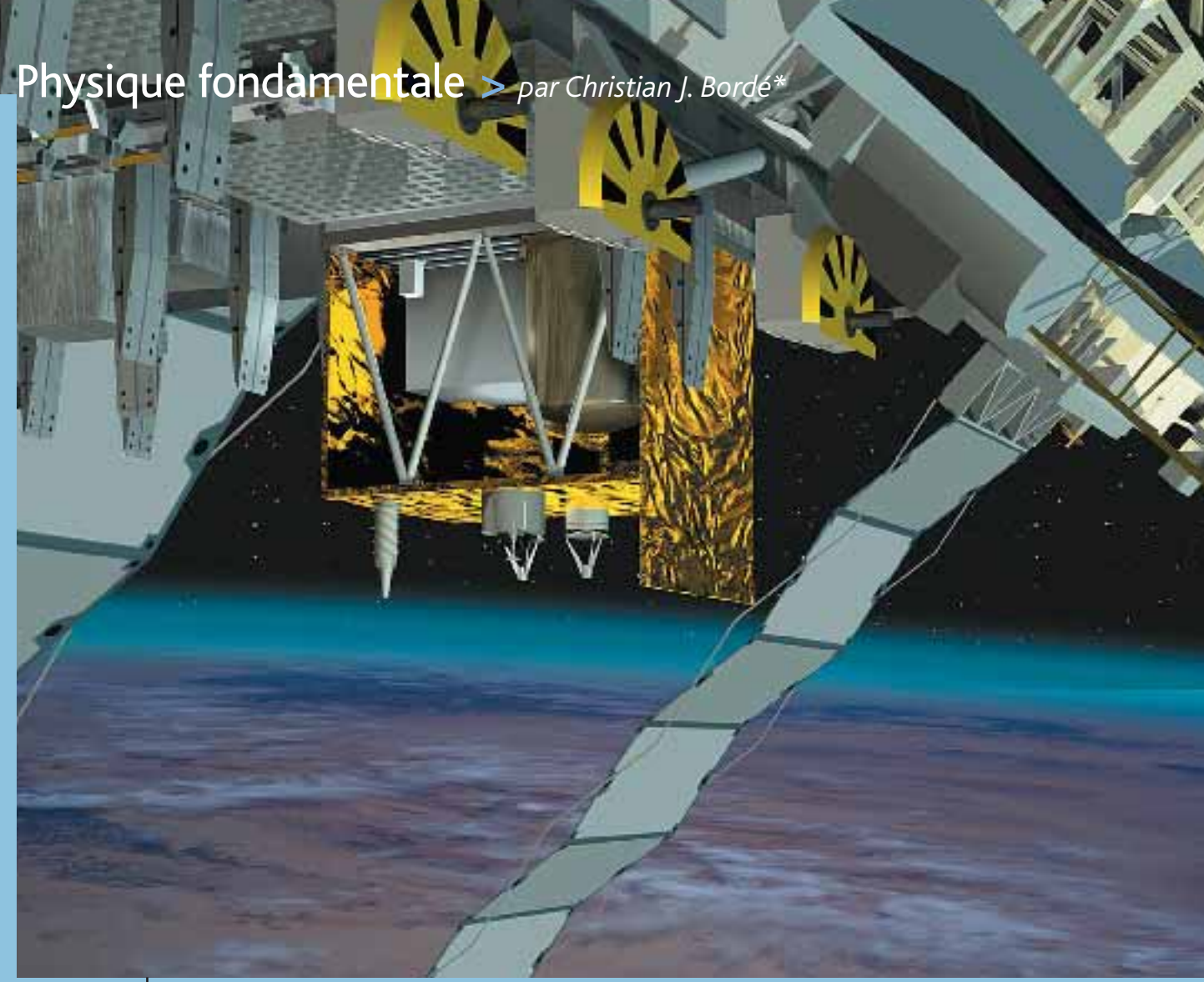
Concernant les missions d'opportunité, des initiatives sont possibles de la part du Cnes pour apporter, à faible coût, une aide système aux projets sous la forme, par exemple, d'une fourniture d'antennes de réception (station d'Aussaguel). C'est aussi un moyen d'impliquer les scientifiques à des projets,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



Soutien Cnes

Hors "vol en formation" et à partir des éléments connus, un programme "SHM" satisfaisant et raisonnable peut se chiffrer à hauteur d'une centaine de millions d'euros couvrant globalement la période 2005-2020 (15 ans). Cette somme se répartit de manière sensiblement égale entre les composantes solaires et magnétosphériques.

(R7) L'optimisation du rendu scientifique de ces projets passe par une politique active pour le soutien (1) de leur dépouillement et de l'exploitation (CDD et Post-Doc), (2) de l'archivage des données et, au delà, le développement d'outils génériques d'utilisation scientifique de ces bases. Le soutien du Cnes à ces activités est fondamental.



L'horloge atomique Pharaon sera installée sur la charge utile ACES (Atomic clock ensemble in space) placée sur une plateforme extérieure de la Station spatiale internationale.

©Cnes/ILL. D. Ducros, 2000

Introduction : réconcilier relativité générale et mécanique quantique

Nous allons voir que les grands enjeux scientifiques de la physique fondamentale dans l'espace rejoignent des enjeux technologiques majeurs pour le développement de la conquête spatiale. Depuis longtemps, l'unification des lois de la physique constitue le "Graal" des physiciens. Le cadre de cette unification est tout naturellement celui imposé par les deux grandes théories physiques du XX^e siècle : la relativité et la mécanique

quantique. Ces deux grandes théories ont elles-mêmes donné naissance à la théorie des champs, qui en incorpore tous les aspects essentiels et y ajoute ceux liés aux statistiques quantiques. La théorie quantique des champs permet le traitement unifié des interactions fondamentales et, en particulier, dans le cadre du modèle standard, celui des interactions électrofaible et forte. La relativité générale est, elle, une théorie classique, de sorte que la gravitation reste à part et ne réintègre le monde quantique que dans les théories récentes de cordes. Ces nouvelles théories prédisent, entre autres choses, de nouvelles forces à longue portée qui viendraient se superposer à la gravitation. Pour tester ces petites violations des théories actuelles et rechercher ces

nouvelles forces à longue portée, on n'a donc pas d'autre choix que de réaliser des expériences de haute précision dans l'espace. Dès la création du groupe de physique fondamentale au Cnes (séminaire de prospective de Saint-Malo, 1993), il est apparu qu'il fallait développer une instrumentation adaptée dans le domaine des horloges, des senseurs gravito-inertiels et des liens électromagnétiques. Tous ces instruments qui permettent d'arpenter l'espace-temps sont aussi ceux qui permettront une navigation précise à l'avenir. **Mesurer l'espace-temps pour la physique c'est donc aussi maîtriser l'espace-temps pour la navigation.** C'est aussi mieux cerner les propriétés de l'espace-temps et de la gravitation pour **l'astronomie et l'astrophysique**. Pour préciser ce que l'on cherche à mesurer, rappelons que les physiciens relativistes caractérisent les propriétés de l'espace-temps par l'intervalle élémentaire : $ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$ où μ et ν prennent la valeur 0 pour la coordonnée de temps et 1, 2, 3 pour les coordonnées d'espace. Le tenseur métrique $g_{\mu\nu}$, objet symétrique à 10 composantes indépendantes, pourra en général être écrit comme une petite déviation $h_{\mu\nu}$ à la métrique de Minkowski :

$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & & & \\ & -1 & & \\ & & -1 & \\ & & & -1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} h_{00} & h_{01} & h_{02} & h_{03} \\ & h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ \text{sym} & & h_{22} & h_{23} \\ & & & h_{33} \end{pmatrix}$$

Ces dix quantités sont au cœur de notre problématique et sont donc l'objet essentiel de toute notre discussion. Elles peuvent être réinterprétées comme les composantes d'un champ de spin-2 et de masse nulle et constituent les potentiels de gravitation de même que $A_\mu = (V, A)$ constitue le 4-potential électromagnétique pour la particule de spin-1 et de masse nulle qu'est le photon. Par analogie, on parlera de champs gravito-électrique et gravito-magnétique. Par exemple, un champ gravito-électrique sera donné par le gradient du potentiel newtonien associé à une masse qui contribuera à la composante temps-temps h_{00} . Mais en relativité générale cette masse va aussi engendrer des composantes espace-espace h_{ij} . Une rotation donnera des composantes temps-espace h_{0i} et le rotationnel de ce vecteur est le champ gravito-magnétique. Il en sera également ainsi lors de l'entraînement des référentiels d'inertie par un corps massif en rotation par effet Lense-Thirring. D'autres composantes espace-espace h_{ij} décrivent la distorsion de l'espace-temps lors du passage d'une onde gravitationnelle. Enfin, il ne faut pas oublier qu'il ne

s'agit que de potentiels qu'une transformation de jauge va modifier en conséquence. Ces potentiels vont intervenir comme autant de termes d'indice pour modifier la propagation des ondes électromagnétiques mais aussi des ondes de matière.

Ce champ de spin-2 est couplé de façon universelle au tenseur d'énergie-impulsion de tous les champs, y compris lui-même. Le caractère universel de ce couplage explique que son effet puisse être ramené à un pur effet de géométrie et entraîne le **principe d'équivalence**. Le fait qu'il se couple avec lui-même est à l'origine de la non-linéarité des équations. Il est habituel de représenter les composantes de ce champ par un développement au-delà de l'approximation newtonienne en fonction de paramètres post-newtoniens (PPN). Par exemple :

$$h_{00} = \frac{2U}{c^2} - 2\beta \left(\frac{U}{c^2} \right) + ..$$

$$h_{ij} = - \left[1 + 2\gamma \frac{U}{c^2} \right] \delta_{ij}$$

où les paramètres de non linéarité β et de courbure γ sont nuls dans l'approximation newtonienne, égaux à l'unité en relativité générale et peuvent différer de l'unité dans les autres théories de la gravitation. Malheureusement l'écart à l'unité prédit par les théories actuelles est très faible. La Figure 1 nous résume 30 ans de progrès dans la détermination de ces paramètres grâce à la recherche spatiale. Il faudrait encore gagner plusieurs ordres de grandeur pour tester valablement ces théories.

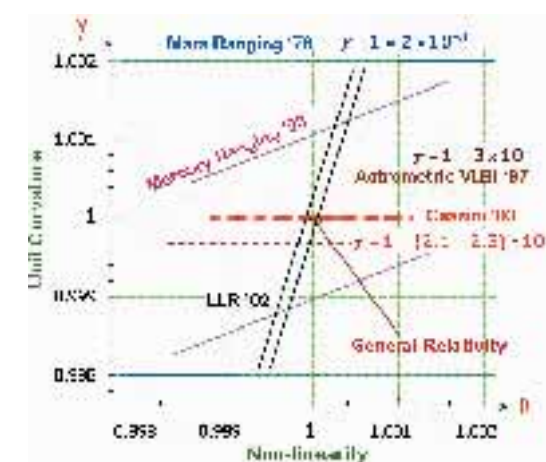


Figure 1 : Trente ans de tests de la relativité dans l'espace.
©S-Turischev

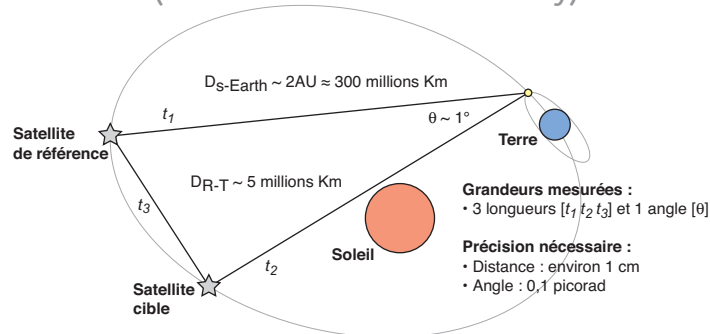
* Laboratoire de physique des lasers.



Figure 1bis (gauche) : Vue d'artiste de la détermination de Gamma avec Cassini. ©Esa/ill. D. Ducros, 2004

Figure 2 (Droite) : Lator - une mission générique de test de la relativité dans le système solaire développée par la Nasa.

Lator (Laser astrometric test of relativity)



Une expérience générique de test de la relativité dans le système solaire est illustré dans la Figure 2. C'est la mission Lator de la Nasa très proche du projet français Sort de Christian Veillet proposé en 1993, lui-même issu du projet Sorel. Deux satellites en orbite solaire définissent avec la Terre un triangle dont on peut mesurer les côtés et l'angle au sommet avec une grande précision au moyen de liens optiques et d'horloges. Cette **triangulation dans l'espace-temps** permet de mesurer la façon dont la métrique est perturbée sur le trajet optique de l'un des côtés lorsqu'il vient tangenter le Soleil, entraînant une déflexion et un retard de phase dans la propagation dénommé retard Shapiro. Cette expérience peut se décliner avec plusieurs variantes mais dans tous les cas il faudra des satellites à compensation de traînée avec

des senseurs inertiels extrêmement sensibles, des horloges de haute exactitude et des liens électromagnétiques très performants. Il est apparu clairement dès le colloque de Saint-Malo, qu'avant de pouvoir mettre sur pied une expérience aussi ambitieuse, il fallait développer toute cette technologie point par point.

Les principales missions spatiales actuellement proposées en physique fondamentale sont dénombrées sur la Figure 3, à l'exception des projets récents sur les atomes froids. Chacune de ces missions est associée à un ou plusieurs développements instrumentaux majeurs, mais est également adossée à un objectif scientifique adapté, qui profite au mieux de la nouvelle technologie testée.

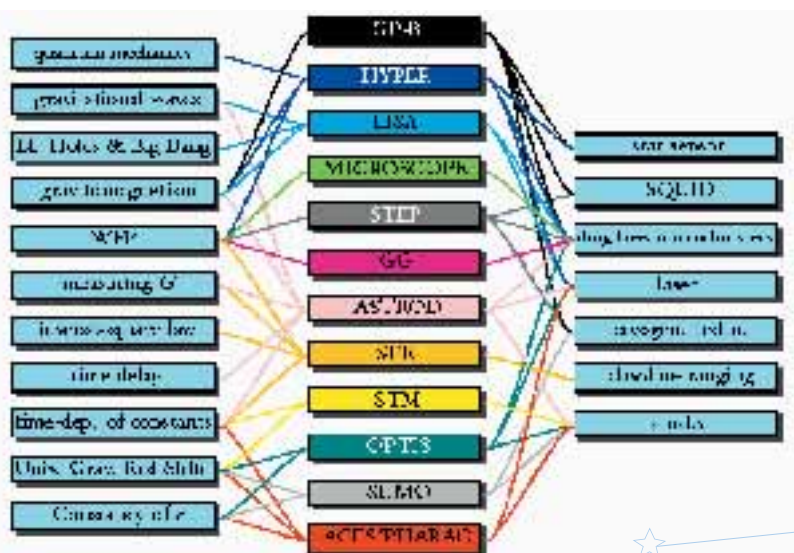


Figure 3 : Principales missions de physique fondamentale dans l'espace, objectifs scientifiques à gauche et technologies requises à droite (d'après C. Lammerzahl et H. Dittus).

Parmi les projets concernant la France et le Cnes nous allons détailler avec ce double éclairage les missions suivantes :

> **Microscope** : l'objectif scientifique est le **test du principe d'équivalence**, c'est-à-dire de l'universalité du mouvement de chute libre ou encore du caractère universel du couplage minimal entre un champ de gravitation de spin-2 et le seul tenseur d'impulsion-énergie des corps. La technologie à valider est la compensation de traînée, ce qui passe par celle de capteurs inertiels de pointe et celle des micropropulseurs ioniques Feep.

> **Pharao/ACES** : les objectifs scientifiques de cette mission vont de la mesure précise de l'effet Einstein (dû à h_{00}) à une étude de la variabilité potentielle des constantes fondamentales. **Les horloges à atomes froids** et la technologie associée vont devenir incontournables dans l'espace, non seulement pour la mesure du temps mais aussi pour ouvrir la voie à toute une future génération de senseurs inertiels utilisant l'interférométrie atomique.

> **T2L2 et les liens électromagnétiques** : ici encore, les technologies essentielles développées pour transférer les signaux d'horloges servent aussi à sonder les propriétés de l'espace-temps au cours de la propagation des ondes électromagnétiques, en particulier l'effet Shapiro dû à h_{00} et h_{ij} . L'application à la navigation interplanétaire est plus que séduisante et ces liens seront largement mis à profit dans des missions scientifiques futures plus ambitieuses telles que Optis et Astrod aux multiples objectifs de tests de la relativité.

> **Hyper** et le domaine en pleine expansion des **applications spatiales des atomes froids** satisfont aussi le double critère de validation de technologies nouvelles potentiellement très importantes pour la navigation des satellites et de poursuite de plusieurs objectifs scientifiques ambitieux : étude de la signature de l'effet Lense-Thirring dû à un potentiel h_{0j} induit par la rotation terrestre, accéléromètres ultra-sensibles et absolus, mesure beaucoup plus précise de la constante de structure fine et enfin études de décohérence des ondes de matière.

> **Lisa et la détection des ondes gravitationnelles** constituent un point d'orgue pour toute la recherche technologique qui précède et qu'il s'agira de valider en partie au cours de la mission

Lisa Pathfinder. Les objectifs dépassent les ambitions du physicien relativiste qui veut caractériser les propriétés des ondes gravitationnelles hij et rejoignent celles de l'astrophysicien en lui apportant une nouvelle façon d'observer l'Univers.

Chacun de ces cinq volets est présenté ci-dessous dans sa perspective propre par ses principaux protagonistes.

Le test du principe d'équivalence

Par Pierre Touboul

La mission Microscope

La mission Microscope a pour objectif scientifique principal de tester le Principe d'équivalence (PE) avec une précision d'au moins 10^{-15} . Le principe d'équivalence, c'est-à-dire essentiellement l'égalité des masses inerte et grave, puis l'identité des lois de la physique dans des repères soumis à un champ d'accélération d'une part, ou de gravité d'autre part, est l'un des principes fondateurs de la relativité générale. Si les observations, effectuées jusqu'à présent, des prédictions de cette théorie classique se sont montrées toujours conformes, l'unification avec les autres interactions, considérées elles dans le cadre de la théorie quantique et du modèle standard, présente des difficultés toutes particulières.

Dans la très grande majorité des développements théoriques qui généralisent le modèle standard apparaît la possibilité d'existence d'une nouvelle interaction, en plus de celles déjà connues. Cette nouvelle interaction correspond à de nouveaux bosons de jauge neutres et peut se manifester, suivant les valeurs de leurs masses, en physique des particules ou par l'existence de nouvelles forces à longue portée. Elle peut résulter de l'échange de particules de type dilaton, axion, etc. dont l'existence est suggérée par certains modèles issus de la théorie des cordes et/ou (et) par des considérations cosmologiques.

Les observations aux échelles galactiques ou cosmologiques semblent en effet indiquer que l'Univers, de densité proche de la densité critique, est constitué d'environ un tiers de " matière noire " et de deux tiers " d'énergie noire " dont nous ne savons pas grand chose et qui sont des défis théoriques et expérimentaux.

Quelle que soit son origine, **une éventuelle nouvelle force pourrait, en se superposant à la gravitation, être mise en évidence comme une violation du principe d'équivalence.** C'est donc cette quête qu'entreprend le projet Microscope. Par ailleurs, une non-violation du principe d'équivalence mesurée avec une précision meilleure de plusieurs ordres de grandeur apporterait des contraintes indispensables aux modèles de grande unification développés par les théoriciens.

Le principe de l'expérience Microscope est fondé sur la **chute libre en orbite autour de la Terre de deux corps de composition différente.** Ces deux masses sont protégées dans leur mouvement par le satellite qui les entoure. Elles baignent également dans un champ électrique asservi permettant de contrôler si nécessaire leur mouvement relatif. La mesure des pressions électrostatiques ainsi réalisées pour maintenir les deux corps sur la même orbite avec une précision de la dizaine de picomètres fournira l'information utile. Cette information sera en premier lieu exploitée en orbite pour que le satellite suive les deux masses afin d'annuler, autant que faire se peut, les champs électriques communs les entourant. Elle sera ensuite traitée au sol pour détecter la moindre dissymétrie corrélée au champ gravitationnel de la Terre.

L'expérience Microscope sera embarquée à bord d'un microsatellite du Cnes, issu de la filière Myriade. Les contraintes imposées par le satellite sur la charge utile en terme de puissance, de volume et de masse ont conduit à rejeter toute expérience fonctionnant à température cryogénique et, ainsi, à limiter les performances escomptées pour le test PE. L'emploi d'un microsatellite est en revanche le garant d'une possibilité de mission dans un court avenir (la durée de développement de l'expérience GPB restant dans les mémoires).

Le satellite d'une masse totale de 180 kg (Figure 4) sera injecté sur une orbite circulaire, quasi polaire,

héliosynchrone, à une altitude autour de 710 km. L'excentricité de l'orbite devra être inférieure à 0,005 afin de limiter les effets induits par le gradient de gravité terrestre. L'altitude est un compromis entre l'amplitude des forces aérodynamiques résiduelles sur le satellite et celle du champ de gravité. En choisissant une orbite héliosynchrone 6h-18h, le satellite bénéficie d'un éclairage maximum et quasi constant pour ses panneaux solaires de taille ainsi réduite. Il est essentiel que l'expérience ne soit pas perturbée par le comportement thermo-élastique de la structure du satellite ou par les fluctuations de sa propre gravité. La stabilité thermique de l'instrumentation est également un élément clé pour les performances de la mission.



Figure 4 : Le satellite Microscope embarquera en orbite héliosynchrone quatre senseurs inertiels associés deux à deux et sera contrôlé au moyen de quatre ensembles de trois propulseurs électriques.

©Esa/ill. D. Ducros, 2004

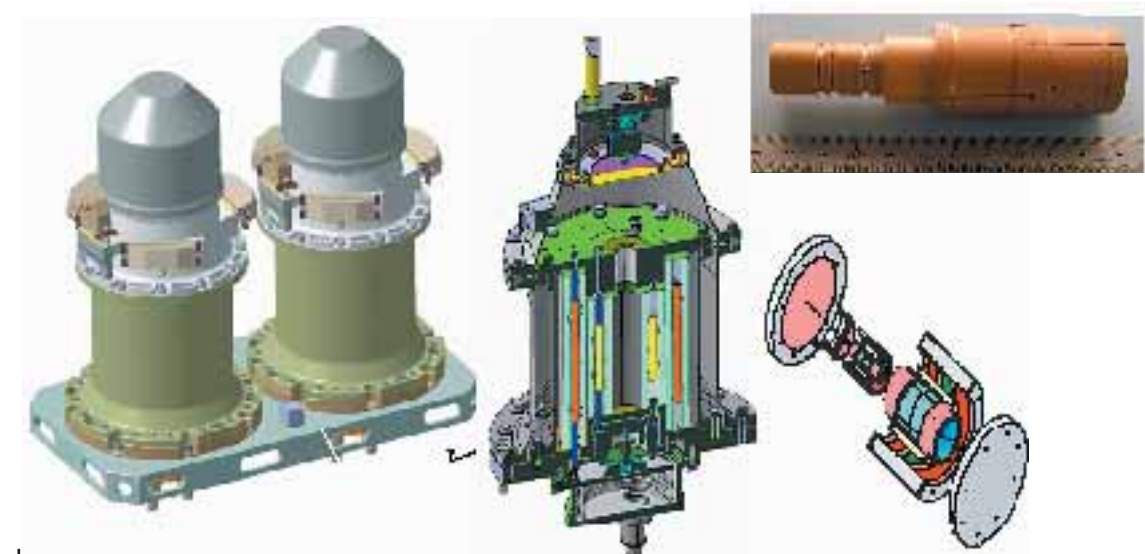


Figure 5 : L'instrument Microscope est composé de deux accéléromètres Sage (*Space accelerometer for gravitation experiment*) comprenant chacun deux senseurs inertiels électrostatiques concentriques et centrés. En haut à droite, la photo présente les pièces en silice déjà réalisées pour le prototype de l'instrument.

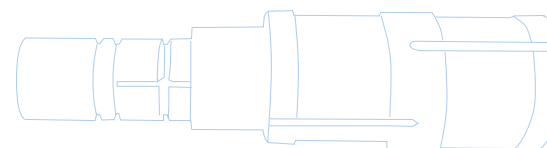
Au cœur d'une double enceinte thermique au centre du satellite, deux accéléromètres électrostatiques différentiels identiques comprennent en leur sein deux couples de masses concentriques cylindriques (Figure 5). Chacune est la masse d'épreuve d'un senseur inertiel six axes dont la structure en silice dorée présente une géométrie aussi précise que stable. Le positionnement relatif des deux masses est réalisé par construction à mieux que 20 μm et sera estimé au cours de l'expérience à 0,2 μm près. Chacun des senseurs inertiels présentera une résolution de l'ordre de $10^{-12} \text{ ms}^{-2} \text{ Hz}^{-1/2}$ permettant la détection d'un signal différence de quelques femto- g lorsqu'il est intégré sur une durée de 20 orbites. Le signal éventuel de violation du PE étant corrélé à l'orientation de l'instrument dans le champ de gravité terrestre, il est possible de moduler sa fréquence en contrôlant le pointage du satellite, inertiel ou tournant autour de la normale au plan orbital. De ce fait, phase et fréquence étant connues, une détection hétérodyne du signal de mesure peut être effectuée en exploitant la durée de la mission, soit un an.

Pour obtenir une telle précision dans la mesure de la différence des accélérations appliquées sur les deux masses, il est indispensable que le niveau maximum des accélérations soit bien inférieur au micro- g et précisément contrôlé. Les écarts entre les matrices de sensibilité des accéléromètres introduisent, comme le

décentrage des masses, des perturbations proportionnelles aux mouvements d'attitude du satellite ou à sa traînée résiduelle. C'est pourquoi, un jeu de quatre ensembles de trois micropropulseurs électriques de type Feep est actionné linéairement, avec un pas de 0,1 μN , pour contrebalancer finement les forces et couples appliqués directement sur le satellite (traînée aérodynamique, pressions de radiation, effet du moment magnétique résiduel du satellite, etc.).

Enfin, les deux accéléromètres différentiels différeront par la nature de leur couple de masses. L'un comportera deux masses de composition différente tel que le platine et le titane. L'autre comportera deux masses en platine afin de vérifier la précision de l'expérience. Ainsi, c'est par une double différentiation que pourront être rejetées les perturbations aux mouvements des deux masses.

Après la revue de fin de phase A, tenue avec succès en novembre 2003, la mission est depuis mai 2004 en phase B : instrument et satellite sont en cours de définition détaillée, ainsi que les procédures de la mission et de l'expérience. En 2005, l'instrument prototype sera réalisé puis qualifié. Le modèle de vol devrait être intégré dans le satellite en 2007 pour un lancement programmé en mars 2008.



Missions post Microscope

La mission Microscope fournira non seulement le test du principe d'équivalence, avec une précision encore jamais réalisée, mais démontrera également les possibilités offertes par l'espace pour les expériences similaires en physique fondamentale, nécessitant des mesures de force de plus en plus sensibles dans des environnements de mieux en mieux contrôlés : maîtrise de l'environnement vibratoire et gravitationnel par le système de compensation de traînée, maîtrise de l'environnement magnétique et thermique, pointage fin dans un champ de gravité modélisé de plus en plus précisément.

Un signal validé de violation du PE, détecté par la mission Microscope, conduirait à bouleverser notre vision de la gravitation et nécessiterait donc de poursuivre au plus vite la découverte du domaine exploré. En effet, des conditions expérimentales complémentaires, d'autres couples de matériaux devront être testés afin de conforter le résultat obtenu et préciser dans quelle condition cette violation apparaît. Des missions récurrentes de Microscope devront alors être envisagées dans un très court délai, avec un moindre coût de développement et des risques limités tout en permettant l'amélioration des performances de la mission au vu de l'expérience opérationnelle et de traitement des données acquises avec la mission Microscope.

La confirmation du principe d'équivalence avec une précision de 10^{-15} repousserait plus loin les interrogations actuelles sur la théorie de la gravité. Il serait alors nécessaire de considérer des expériences de précision encore plus grande, exploitant l'acquis de Microscope. Les voies envisagées aujourd'hui sont toutes deux **cryogéniques** et nécessitent l'emploi d'un minisatellite de masse atteignant 500 kg. Cela était le cas du projet **GeoSTEP** étudié par le Cnes et l'Onera au milieu des années 90 et qui considérait l'emport de quatre accéléromètres électrostatiques différentiels au sein d'un cryostat à l'hélium liquide : la basse température permettrait alors d'envisager une précision de 10^{-17} en réduisant les bruits thermodynamiques ou liés à la pression résiduelle et aux variations de champs magnétiques (Figure 6). Une telle mission bénéficierait bien sûr directement des développements instrumentaux de la mission Microscope, la possibilité de fonctionnement à 4 K d'un tel instrument ayant déjà été démontrée en laboratoire.

Un projet de satellite encore plus ambitieux **MiniSTEP** a été proposé par l'Université de Stanford avec le *Jet propulsion laboratory* (JPL) de la Nasa et une collaboration européenne. Ce projet vise une précision de 10^{-18} en considérant un cryostat à 2 K, des suspensions magnétiques supraconductrices des masses et des détecteurs de position au moyen de Squid. La complexité de fonctionnement

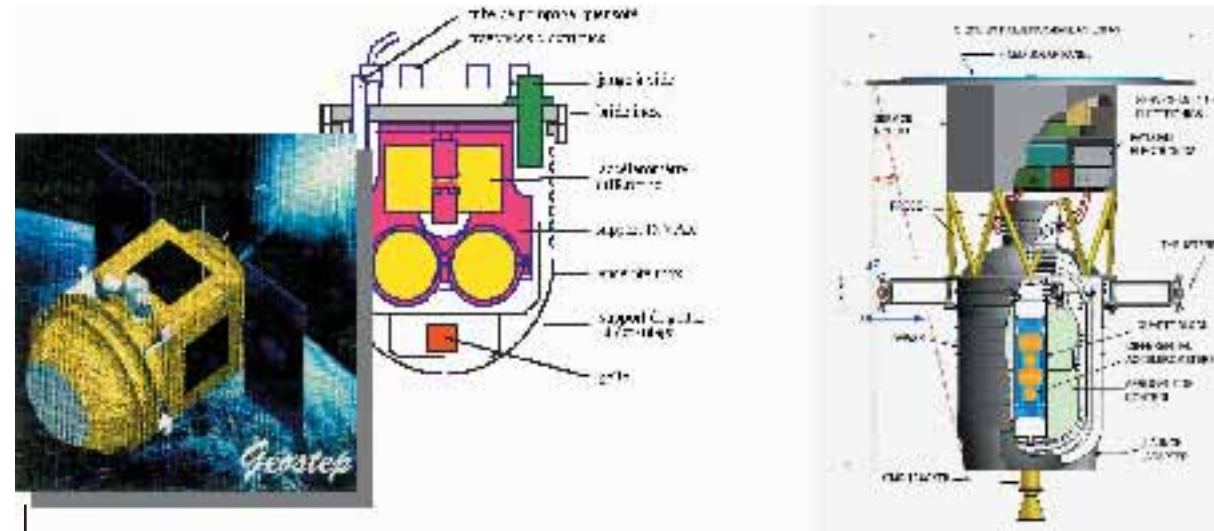


Figure 6 : A gauche, le satellite GeoSTEP, étudié par le Cnes dans le cadre de sa filière de minisatellites Protéus, embarque un cryostat comprenant quatre accéléromètres électrostatiques différentiels. À droite, le satellite MiniSTEP étudié par l'Université de Stanford reprend la configuration du satellite GPB.

de l'instrument, qui doit également être associé à un satellite à traînée compensée beaucoup plus performant, nécessitera d'adjoindre également un système électrostatique de positionnement et d'amortissement des masses qui fournira au satellite l'information nécessaire à son contrôle. L'équipe de l'Onera participe dans ce cadre à cette proposition qui bien sûr bénéficiera des acquis de Microscope.

Le développement d'interféromètres à ondes de matière utilisés comme accéléromètres, gyromètres ou gradiomètres de très grande exactitude intéresse aujourd'hui en France, comme à l'étranger, de nombreux laboratoires (voir page 85). Dans la lignée de Microscope, ces instruments pourraient permettre également le test du principe d'équivalence en considérant par exemple des interféromètres associant les atomes de césium et rubidium. L'intérêt de tels tests résiderait non seulement dans les qualités de l'instrument utilisé, mais également dans la comparaison entre les résultats obtenus au niveau macroscopique sur des corps solides et au niveau atomique.

Les horloges à atomes froids et leurs applications aux tests d'effets relativistes

Par Christophe Salomon, André Clairon et Pierre Lemonde

Les méthodes de refroidissement et de manipulation d'atomes ont provoqué une **révolution dans le domaine de la mesure du temps**. Aujourd'hui, les meilleurs étalons de temps sont des **fontaines atomiques** utilisant des atomes refroidis par laser. Leur stabilité de fréquence atteint $2 \cdot 10^{-16}$ pour une durée de mesure de 40 000 secondes. L'environnement de micropesanteur accessible dans l'espace permet d'augmenter la durée d'interaction des atomes dans la cavité micro-ondes et, ainsi, d'améliorer la résolution d'un facteur dix. On attend aussi une excellente exactitude pour ces nouvelles horloges atomiques. Ces progrès permettent de réaliser de nouveaux tests de relativité restreinte et générale ou de physique fondamentale. Ils conduisent potentiellement à des percées technologiques dans la construction

et la dissémination de l'échelle de temps. Ils ouvrent aussi la voie à la réalisation des senseurs inertiels fondés sur l'interférométrie atomique.

Pharao/ACES

Pharao est un Projet d'Horloge Atomique par Refroidissement d'Atomes en Orbite, développé par le Laboratoire Kastler-Brossel (LKB), le Laboratoire systèmes de références temps-espace (Syrté) de l'Observatoire de Paris et le Cnes. Ce projet d'horloge fait partie du projet ACES décidé par l'Esa et prévu pour être installé sur une plateforme externe de la Station spatiale internationale (ISS) pointant au Nadir, emportée par la navette américaine pour une durée de 18 mois (Figure 7).

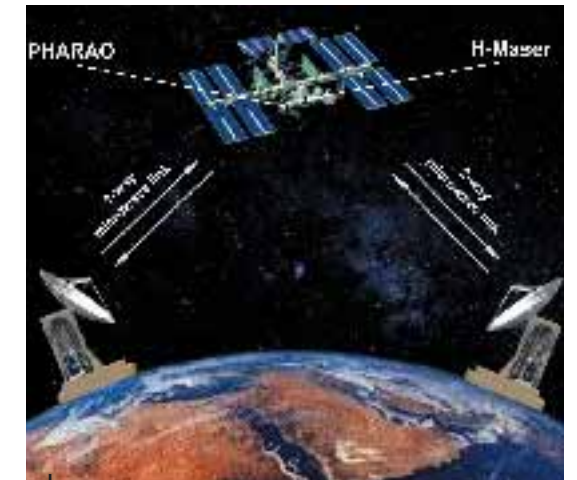


Figure 7 : La mission ACES comporte une horloge à atomes froids Pharao, un maser à hydrogène SHM et un système de transfert de temps micro-ondes MWL.

ACES comprend l'horloge à atomes de césium refroidis Pharao (Figures 8 à 10) fournie par la France et un maser à hydrogène SHM ayant une excellente stabilité à court terme fourni par la Suisse, ainsi qu'un lien bord-sol de transfert de temps et de fréquence dans le domaine micro-ondes MWL. Les horloges à bord sont comparées, d'une part entre elles et, d'autre part, à des horloges au sol. Un système d'orbitographie très précise de type GPS, implanté sur l'ISS, fournira les données de position et de vitesse sur la base desquelles des corrections relativistes de temps et de fréquence pourront être effectuées. Pharao est en phase de réalisation industrielle.

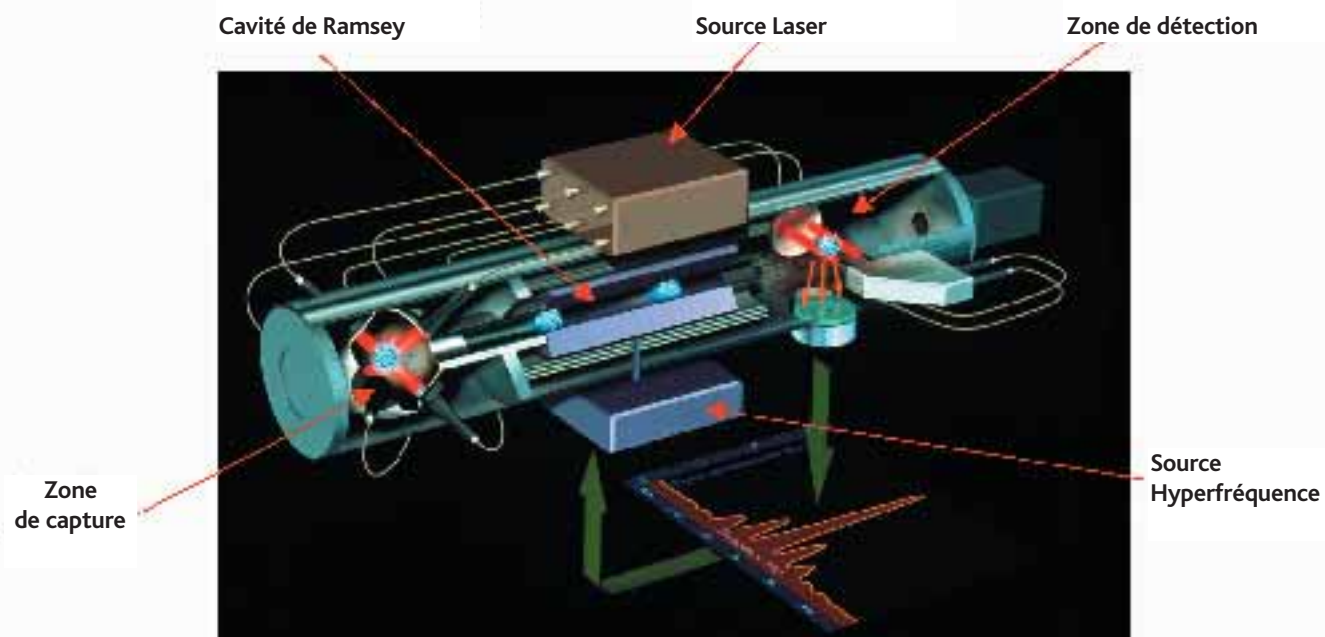


Figure 8 : Principe de l'horloge atomique spatiale Pharaon. Cette horloge fonctionne de manière séquentielle. Dans un premier temps, les atomes de césium sont capturés et refroidis à l'intersection de six faisceaux laser dans une mélasse optique. Ils sont ensuite lancés vers la cavité hyperfréquence par les faisceaux lasers eux-mêmes, à des vitesses pouvant varier de 5 cm/s à 5m/s. Les atomes arrivent ensuite dans une cavité de type Ramsey, où ils subissent l'interaction avec un champ hyperfréquence proche de la fréquence hyperfine du césium, 9 192 631 770 Hz. Puis ils sont détectés optiquement par un dispositif de mesure de la fluorescence après excitation laser. Le nombre d'atomes détectés dans les deux niveaux d'énergie fournit une information permettant d'asservir la fréquence de l'oscillateur contenu dans la source hyperfréquence sur la résonance hyperfine de l'atome de césium. Pour une vitesse de lancement de 10 cm/s, on attend une résonance de largeur 0,2 Hz, bien plus fine que dans les fontaines sur Terre.

Les premiers sous-systèmes de l'instrument spatial sont livrés (cavité de Ramsey, chaîne de synthèse micro-ondes, calculateur, logiciel) et sont en cours d'évaluation au Cnes Toulouse et dans les laboratoires. Le modèle d'ingénierie sera disponible courant 2005. Les **objectifs** de Pharaon/ACES sont à la fois **technologiques** - fonctionnement de l'horloge avec des performances de stabilité et d'exactitude ultimes, comparaisons de temps entre horloges distantes au niveau de quelques picosecondes - et **scientifiques** - tests de la relativité par la mesure du décalage gravitationnel vers le rouge, recherche d'une éventuelle dérive en fonction du temps de la constante de structure fine et recherche d'une éventuelle anisotropie de la propagation de la lumière. La stabilité de fréquence de l'horloge Pharaon devrait atteindre 10^{-16} sur quelques jours. Ceci permettra de disposer d'une référence primaire de temps ultra-stable avec une couverture mondiale : les comparaisons entre horloges pourront s'effectuer au niveau de la dizaine de picosecondes, soit environ deux ordres de grandeur au-delà des performances actuelles des systèmes GPS et Glonass. L'effet Einstein de décalage vers le rouge

pourra être vérifié avec un gain d'un facteur 30 et une éventuelle anisotropie de la vitesse de la lumière testée avec un gain d'un facteur 10. En terme de dérive en fonction du temps de la constante de structure fine, le niveau de 10^{-16} par année est visé.



Figure 9 : Le banc optique de Pharaon comporte huit diodes laser stabilisées en fréquence. La lumière nécessaire pour refroidir et manipuler les atomes est envoyée au tube à vide à l'aide de fibres optiques. ©EADS - Sodern



Figure 10 : Le modèle de vol de la cavité d'interrogation de l'horloge Pharaon. Les atomes lents traversent le dispositif à l'intérieur du guide rectangulaire visible sur la gauche de la cavité.

©EADS - Sodern

Missions post Pharaon

Au-delà de la mission Pharaon/ACES, des **horloges ultra stables placées dans des satellites en orbite géostationnaire ou en orbite de type GPS** pourraient, dans le futur, fournir la définition du temps atomique international avec une meilleure précision que les horloges au sol actuellement utilisées. À terme, on pourrait atteindre puis dépasser la limite, aux alentours de 10^{-17} sur une journée, imposée par la connaissance imparfaite du champ de gravité terrestre. Ceci suppose bien sûr que l'on dispose de liens sol/bord au même niveau de précision que les horloges. Ces liens fonctionneront dans le domaine radio et optique (T2L2). Une maîtrise de ces techniques pourrait permettre d'améliorer la connaissance des forces de surface agissant sur le satellite et celle du champ de gravité de la Terre. À plus long terme, apparaît la perspective d'un positionnement de type GPS avec une bien meilleure précision.

En physique fondamentale, on pourrait améliorer les tests de la relativité par comparaison entre des horloges en mouvement autour de la Terre ou de la stabilité des constantes fondamentales par comparaison d'horloges de natures différentes. On peut mesurer l'effet Einstein de déplacement vers le rouge des fréquences par comparaison d'horloges placées à des potentiels gravitationnels différents. Cette mesure serait facilitée en utilisant un satellite sur une orbite très elliptique permettant de faire varier le déplacement. D'autres tests de relativité pourraient être faits en comparant une horloge atomique à un oscillateur macroscopique ultrastable,

par exemple un oscillateur cryogénique ou un laser stabilisé sur une cavité optique de haute finesse. À long terme, une mesure de l'effet Shapiro, délai temporel subi par le champ électromagnétique lors de sa propagation dans le champ gravitationnel, pourrait être effectuée par une horloge ultraprécise en orbite héliocentrique.

Dans le domaine de l'astronomie, des horloges ultra-stables pourraient conduire à une meilleure **connaissance des mécanismes de génération d'ondes gravitationnelles à l'œuvre dans les pulsars**, ainsi qu'à de meilleures contraintes sur le fond de rayonnement gravitationnel le long du parcours des signaux émis par les pulsars vers la Terre.

L'interférométrie à grande ligne de base (VLBI) repose sur la stabilité de la différence de phase entre les horloges de deux récepteurs très éloignés (distances intercontinentales) pour résoudre angulairement les sources astrophysiques de lumière infrarouge ou visible. Aujourd'hui la résolution angulaire atteinte, de l'ordre de 30 microsecondes d'arc, est limitée par les fluctuations de l'indice de réfraction de la troposphère. En plaçant dans l'espace et à grande distance deux antennes de réception associées à deux horloges à atomes froids, il semble possible de passer sous le seuil de la microseconde d'arc, une amélioration de la résolution par deux ordres de grandeurs, et d'augmenter considérablement le temps de cohérence des mesures, donc le rapport signal sur bruit.

Prospective sur les horloges à atomes froids

Les horloges atomiques ont considérablement bénéficié depuis le début des années 90 du développement des techniques de manipulation d'atomes par laser. Les horloges utilisant des transitions micro-ondes atteindront 10^{-16} avec la mission spatiale Pharaon/ACES. De nouveaux types d'horloges, utilisant des transitions dans le domaine optique, permettraient encore de gagner deux ordres de grandeur d'ici 2020. Un certain nombre de tests de physique fondamentale exploitant la précision et la stabilité de telles horloges sont envisagés (voir la partie précédente) et l'utilisation d'horloges optiques permettrait d'augmenter encore la sensibilité de ces tests, au prix toutefois d'un développement plus important. Les horloges peuvent aussi être utilisées

comme oscillateurs de grande stabilité pour d'autres expériences. Par exemple le projet **Lisa** ne dispose pas de référence de fréquence suffisamment stable pour remplir ses spécifications actuelles. Les nouvelles horloges optiques à atomes froids pourraient atteindre rapidement le niveau de stabilité requis, de l'ordre de $10^{-15} \text{ t}^{-1/2}$. Autre exemple, le déplacement de la fréquence d'horloge dû au potentiel gravitationnel peut être utilisé pour mesurer ce dernier, et ainsi venir compléter les autres méthodes de détermination du champ de gravité. Une horloge optique à 10^{-18} correspond à une sensibilité équivalente en altitude de 1 cm. Cette mesure est faite par comparaison entre horloges, d'où la nécessité de s'assurer du développement simultané d'un lien dont les caractéristiques techniques correspondent au niveau de performance des horloges.

Horloges atomiques micro-ondes

Pour toutes les expériences utilisant des horloges dans le domaine micro-ondes (et plus généralement pour les expériences utilisant des atomes froids), le développement de technologies en cours pour le projet Pharaon simplifiera notablement la conception de nouvelles missions. Certaines améliorations pourront permettre de réduire notablement la masse du banc optique ainsi que sa consommation électrique. On peut notamment envisager d'utiliser des techniques d'optique intégrée, optique fibrée, guidée ou MEMS. Ce type de développement aurait l'avantage de simplifier le banc optique et donc d'améliorer sa fiabilité. De plus, dans le cadre de missions dont l'orbite est plus éloignée de la Terre que pour le projet Pharaon, c'est à dire en dehors de la ceinture de Van Allen, il est important de s'assurer de la fiabilité des sources lasers à semi-conducteur ou de développer des sources plus fiables, soit fondées sur des technologies " télécoms ", soit à l'aide de laser solide.

Le bon fonctionnement de l'horloge atomique micro-ondes nécessite l'utilisation d'un oscillateur à quartz asservi sur un Maser à hydrogène comme dans le projet ACES. Cette solution limite la stabilité des horloges au niveau de 10^{-13} sur la seconde. Il est donc nécessaire de développer de nouveaux types d'oscillateur local permettant de dépasser cette limite: on peut envisager soit l'utilisation d'oscillateurs saphir cryogéniques (3×10^{-16} entre 1 s et 1000 s) à la température de l'hélium, soit une solution intermédiaire à l'azote liquide, soit le développement

d'oscillateurs laser ultra-stables comme pour les horloges à fréquence optique.

Horloges optiques

Les nouvelles possibilités offertes par les horloges optiques nécessitent le développement des nouvelles technologies spécifiques à ce type d'horloge. Il faut premièrement développer de nouvelles sources lasers pour manipuler les atomes utilisés pour ce type d'expériences, par exemple strontium ou calcium. À l'exception de la longueur d'onde, ces lasers ont des caractéristiques techniques (puissance, pureté spectrale, etc.) similaires à celles développées pour le projet Pharaon et devraient pouvoir utiliser les compétences acquises sur ce projet. Il est également nécessaire de développer des lasers ultra-stables (largeur de raie inférieure au Hertz) pour réaliser l'interrogation des atomes. Cette technologie est similaire à celle développée dans les projets Virgo ou Lisa, mais doit être développée à la fréquence spécifique de la transition atomique.

Le développement de ces horloges optiques s'est accéléré avec une percée technologique récente dans la comparaison des fréquences dans les domaines optique et micro-ondes. Les peignes de fréquence issus d'un laser femtoseconde, dont le spectre est élargi dans une fibre optique, permettent une mesure directe de n'importe quelle fréquence dans le domaine visible et proche infrarouge. Cette technologie, maintenant maîtrisée par plus d'une dizaine de laboratoires au monde, doit être développée dans un environnement spatial pour l'utilisation des horloges optiques.

Enfin, ces dispositifs sont très sensibles aux accélérations et rotations parasites et nécessitent donc un environnement très bien contrôlé, probablement avec compensation de traînée. En effet les lasers ultra-stables sont très sensibles aux accélérations résiduelles qui induisent des changements de forme des cavités de référence. Par exemple, l'environnement de la Station spatiale internationale ne permet pas le fonctionnement optimal d'une horloge dans le domaine optique. À l'inverse, l'environnement spatial le plus calme est un facteur très favorable pour réaliser des lasers stabilisés en fréquence avec des largeurs de raies bien inférieures au Hertz.

Les liens électromagnétiques et leurs applications aux transferts de temps, à la navigation et aux tests de la relativité

Par Etienne Samain et Noël Dimarcq

T2L2 et les liens optiques

Pour une puissance donnée, les performances d'un lien, appliqué à la télémétrie ou au transfert de temps, s'améliorent avec la largeur de bande de modulation (qui peut être d'autant plus importante que la fréquence de la porteuse est élevée). Les performances s'améliorent également en augmentant la fréquence de la porteuse si le lien utilise cette dernière pour véhiculer l'information. Le domaine optique (quelques 10^{14} Hz) est naturellement bien adapté pour obtenir de bonnes performances à faible puissance.

La télémétrie ou le transfert de temps par lien laser reposent aujourd'hui sur la mesure du temps de vol d'impulsions laser courtes (modulation d'amplitude incohérente à très faible cadence) entre une station laser sol et une cible spatiale. Ce lien optique permet d'obtenir un filtrage quasiment optimum à l'aide d'un filtrage spectral passif et d'un dispositif de discrimination temporel simple. Les propagations troposphériques génèrent des incertitudes sur les temps de propagation des porteuses optiques qu'il est possible de modéliser à l'échelle de 30 ps seulement, ce qui permet d'obtenir, avec une télémétrie à une seule porteuse, une exactitude centimétrique.

Télémétrie laser des satellites terrestres

La télémétrie laser actuelle, fondée sur des modulations d'impulsions à faible cadence, implique des puissances crêtes élevées relativement difficiles à maîtriser pour des liaisons deux voies longues distances. On peut diminuer la puissance crête, tout en conservant des caractéristiques de rapport signal sur bruit optimales, en augmentant le taux de répétition des impulsions et à condition d'augmenter le temps de cohérence de la porteuse et de mettre en place un filtrage spectral

adéquat. Les corrections troposphériques peuvent être améliorées en deçà du millimètre en analysant la dispersion chromatique d'un spectre étendu générée par l'atmosphère. Le schéma le plus simple serait fondé sur une télémétrie à deux porteuses (télémétrie deux couleurs) mais il pourrait être également envisagé d'utiliser des lasers à impulsions femtosecondes induisant une largeur spectrale importante.

Une télémétrie ou un transfert de temps optique par transpondeur permettrait de simplifier considérablement les stations laser et les opérations d'observation associées. Elle permettrait de mettre au point des stations laser compactes entièrement automatiques et à faible coût. Le segment spatial serait constitué d'une horloge, d'un système de datation, d'un système de photo-détection statique, et d'une diode laser mobile sans optique.

Lien optique interférométrique

Pour un lien espace-espace sans propagation atmosphérique, il est possible d'utiliser la phase de la porteuse optique associée à des modulations hautes fréquences et obtenir des résolutions subnanométrique. Les lasers femtosecondes à blocage de mode pilotés par des horloges radiofréquences sont des outils extrêmement prometteurs pour l'avenir de cette télémétrie, car ils concilient à la fois une très grande exactitude en fréquence de la porteuse optique et des modulations de cette porteuse très étendues permettant de déduire des distances absolues.

Transfert de Temps par Lien Laser : T2L2

T2L2 (Figures 11 et 12) doit permettre de réaliser un transfert de temps entre des horloges au sol et un transfert entre des horloges au sol et dans l'espace. C'est un lien deux voies à une seule porteuse optique modulée en amplitude. T2L2 permettrait d'atteindre une stabilité $\sigma_x = 1,3 \cdot 10^{-11} \tau^{-1/2}$ s pour $\tau < 1000$ s. Des mesures au sol en grandeur réelle réalisées à l'Observatoire de la Côte-d'Azur (OCA) courant 2004 ont permis de valider expérimentalement ces performances. Les porteurs potentiels sont multiples (microsatellite de la filière Myriade, Optis, Galiléo, coopération avec la Chine). T2L2 n'est sensible qu'aux fluctuations de la troposphère sur les durées de propagation des signaux et ces perturbations n'engendrent qu'un très faible bruit. Les technologies employées sont dérivées de celles de la télémétrie laser.



Figure 11 : Prototype de rétroreflecteur à coin de cube T2L2.

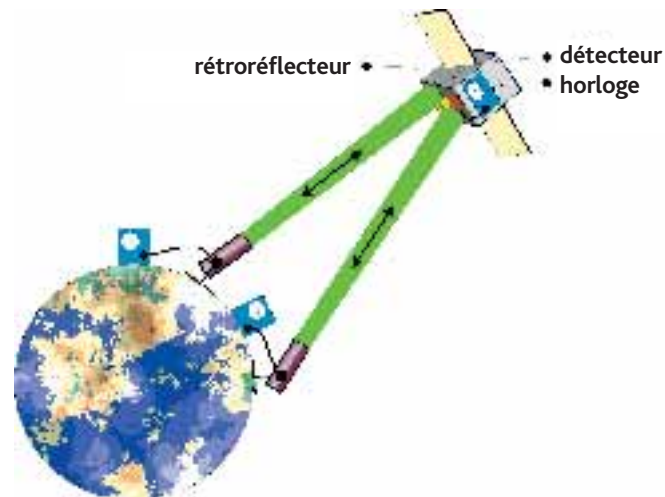


Figure 12 : Principe de T2L2.

Les objectifs sont la comparaison des étalons de fréquence, l'étalonnage et la validation des techniques de transfert de temps radio-électrique et la physique fondamentale (isotropie de la vitesse de la lumière, dérive de la structure fine et mesure du décalage gravitationnel vers le rouge).

Télémétrie interplanétaire optique (Tipo)

Une télémétrie optique fondée sur la mesure du temps de vol d'impulsion lumineuse entre la Terre et une sonde spatiale donnerait accès à des mesures de

distances à l'échelle du système solaire (Figure 13). Deux orientations sont possibles pour réaliser ces mesures :

- > une télémétrie une voie fondée sur l'émission d'impulsions lumineuses depuis la Terre en direction du véhicule spatial, avec un temps de propagation déduit de la différence entre les dates de départ et d'arrivée enregistrées respectivement dans le référentiel d'une horloge sol et d'une horloge spatiale ;
- > une télémétrie deux fois une voie fondée sur l'émission d'impulsions depuis la Terre, et également depuis la sonde, avec une télémétrie déduite du temps propagation aller-retour des impulsions.

Figure 13 : Télémétrie interplanétaire.

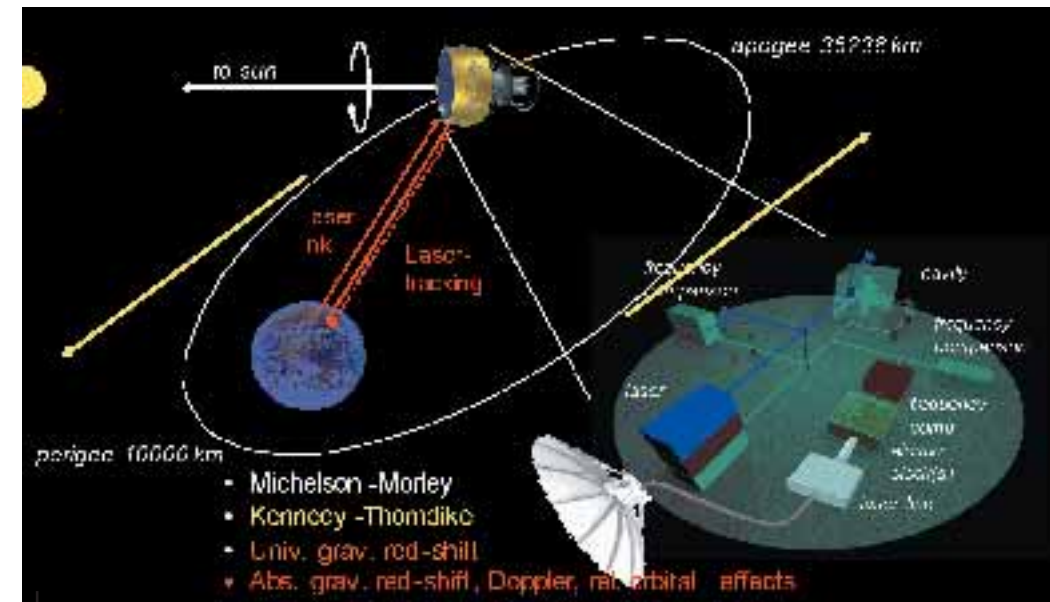
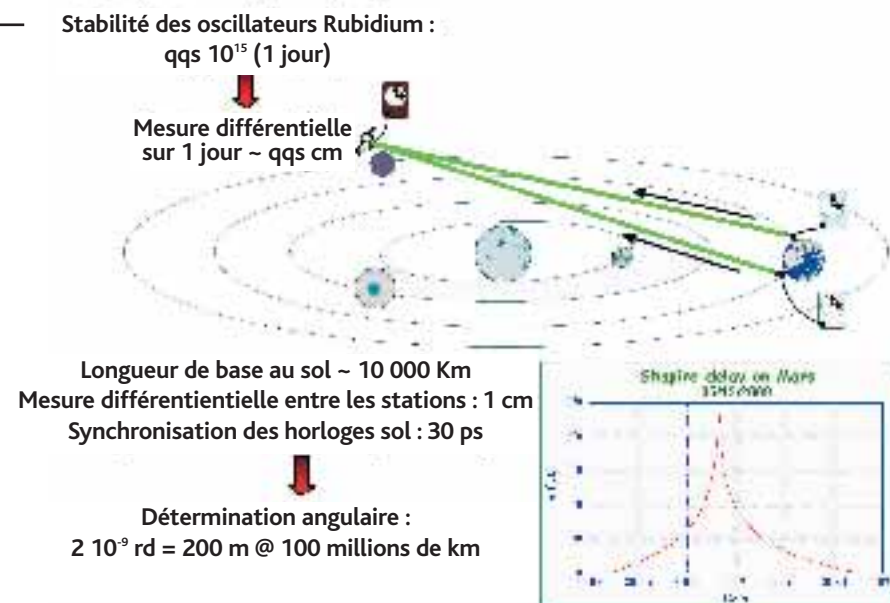


Figure 14 : Proposition de mission spatiale Optis dédiée à des tests de la relativité restreinte et générale.

La première orientation requiert des stabilités d'horloge sur le long terme extrêmement ambitieuses, car les durées à considérer sont les temps d'intégration des signatures du phénomène que l'on cherche à mesurer, qui peuvent aller jusqu'à l'année. Le dispositif optique est, quant à lui, relativement simple car fonctionnant en réception seulement. Les progrès spectaculaires réalisés dans le domaine des horloges ces dernières années et les progrès futurs attendus laissent envisager l'avenir extrêmement prometteur de cette télémétrie optique une voie. La seconde orientation est plus délicate du point de vue de la composante spatiale, car elle nécessite un télescope pointé en direction de la Terre, mais ne requiert rien de particulier en terme d'oscillateur spatial. Elle permet une télémétrie ayant un niveau d'exactitude limité seulement par l'exactitude de l'horloge terrestre (Figure 14).

Des observations en réseau à l'aide de plusieurs stations de télémétrie par laser synchronisées permettraient un positionnement du véhicule dans le plan perpendiculaire à l'axe de visée. En terme de navigation dans le système solaire, on accéderait à une télémétrie radiale millimétrique et à des positionnements à quelques centaines de mètres près dans le plan perpendiculaire.

Des simulations en orbite solaire (du type Vénus) d'une sonde équipée d'une instrumentation de télémétrie

2 x 1 voie ayant une exactitude millimétrique et d'un senseur inertielle - trainée compensée permettant d'obtenir un résidu d'accélération inférieur à $10^{-13} \text{ ms}^{-2} \text{ Hz}^{-1/2}$, ont permis d'évaluer précisément les incertitudes des grandeurs suivantes (Tang et Ni, 2003 ; Ni et al, 2003) :

- > paramètres Ppn γ et β : 10^{-8}
- > variation dans le temps de la constante de gravitation G/G : 10^{-15}
- > moment quadrupolaire du Soleil J_2 : 10^{-8}
- > masses des trois astéroïdes Cérès, Pallas et Vesta : 10^{-4}
- > densités de plusieurs centaines d'astéroïdes ayant un rayon $> 65 \text{ km}$: 10^{-3}

L'étude d'une telle mission, fondée sur une collaboration franco-chinoise, est en cours.

La mission spatiale Optis : tests de la relativité restreinte et générale

L'expérience est fondée sur la comparaison d'horloges de différentes natures placées dans différentes configurations. Les objectifs scientifiques principaux sont la mesure de l'isotropie de la vitesse de la lumière, la dilatation du temps, l'universalité et la mesure absolue du décalage gravitationnel vers le rouge et la mesure de l'effet *Lense-Thirring* (Lämmerzahl, 2004). L'expérience est constituée

d'un oscillateur atomique, de deux cavités optiques (oscillateur optique), d'un dispositif à peigne optique pour permettre la comparaison des oscillateurs optiques avec l'oscillateur atomique, d'un senseur inertielle couplé à un système à traînée compensée et d'une instrumentation de Transfert de Temps par Lien Laser (T2L2) et de télémétrie laser. Ce lien laser doit permettre la comparaison des oscillateurs spatiaux avec des références terrestre et la détermination exacte de l'orbitographie du satellite.

Les liens micro-ondes

Différentes techniques de transfert de temps via des liens micro-ondes sont utilisées aujourd'hui pour le positionnement par satellite ou la comparaison d'horloges distantes (Tableau 1) : GPS, Glonass, *Two ways satellite time and frequency transfer* (TWSTFT).

- Parmi les nouvelles techniques en cours de développement, on peut citer :
- > le lien Galiléo, dont le principe et les performances sont analogues à ceux du lien GPS existant ;
 - > ACES MWL, lien micro-ondes développé pour le projet ACES déjà cité (voir page 75), qui devrait démontrer des performances d'un à deux ordres de grandeur meilleures que celles de GPS ;
 - > T2L2, lien optique pour la télémétrie et la comparaison d'horloges.

Il est clair que l'amélioration des performances apportées par les nouvelles horloges, opérant au sol ou dans l'espace, doit être accompagnée d'une amélioration des performances des techniques permettant de comparer leur fréquence et leur temps. Aujourd'hui déjà, ces techniques sont une limitation puisqu'il faut attendre de nombreux jours

Lien	Type de comparaison	Technique (nombre de voies, domaine de fréquence, type de mesure, etc.)	Performance typique (ordres de grandeur)
GPS, Glonass Galiléo	Entre deux horloges sol en vue commune d'une même horloge GPS.	Lien descendant. 2 fréquences en bande L. Mesure au sol des phases de la porteuse et du code PRN.	Stabilité (mesurée pour GPS, prévue pour Galiléo) : 100 ps - 1 ns sur 1 jour Exactitude : 1 ns
TWSTFT	Entre deux horloges sol via un transpondeur à bord d'un satellite géostationnaire.	Liens montant et descendant. 2 fréquences en bande Ku Mesure au sol de la phase du code PRN.	Stabilité (mesurée) : 100 ps - 1 ns sur 1 jour Exactitude : 1 ns
ACES MWL	Entre une horloge spatiale et une horloge sol. Entre deux horloges sol, en vue commune ou non-commune de l'horloge spatiale.	Liens montant et descendant. 2 fréquences en bande Ku et 1 fréquence en bande S Mesure au sol et dans l'espace des phases de la porteuse et du code PRN.	Stabilité (prévue) : < 0,3 ps sur 300 s < 6 ps sur 1 jour Exactitude ≈ 100 ps
T2L2	Entre une horloge spatiale et une horloge sol. Entre deux horloges sol, en vue commune ou non-commune de l'horloge spatiale.	Liens montant et descendant. 1, voire 2 fréquences dans le domaine optique. Datation des impulsions au sol et dans l'espace.	Stabilité (prévue) : < 0,3 ps sur 1000 s < 5 ps sur 1 jour Exactitude : 50 ps

Tableau 1 : Caractéristiques des techniques de transfert de temps/fréquence.

d'intégration afin de moyennner le bruit du lien au niveau de bruit des meilleurs étalons primaires. Le système Galiléo, dont les caractéristiques sont proches de celles du GPS existant, n'apportera pas une amélioration notable de performance. Toutefois, la force des systèmes GPS et Galiléo réside dans le grand nombre de récepteurs sol, l'organisation efficace de la communauté des utilisateurs (par le BIPM et l'IGS entre autres), et par le grand nombre de satellites observables en vue commune. Le développement de nouveaux récepteurs sol, traitant conjointement les signaux GPS et Galiléo, est une nécessité pour optimiser le couplage entre les observations via ces deux systèmes.

Il est donc essentiel de développer et de mettre en œuvre de façon opérationnelle des nouvelles techniques de transfert temps/fréquence, complémentaires de GPS et Galiléo, et capables de comparer des horloges distantes avec des performances en fréquence meilleures que 10⁻¹⁶, correspondant à des fluctuations temporelles de l'ordre de 10 ps après un jour d'intégration. Ce niveau de performances doit être obtenu sur des durées réduites pour pouvoir répondre aux besoins des futures horloges optiques, qui ont une stabilité à court terme exceptionnelle mais dont la complexité ne permet pas encore d'assurer un fonctionnement continu sur des durées importantes.

Deux techniques sont aujourd'hui très prometteuses et en cours de développement dans le cadre de projets auxquels le Cnes et les laboratoires français contribuent activement : le lien optique T2L2 et le lien micro-ondes MWL du projet ACES.

Le lien MWL repose sur une technique de type "deux voies" (Figure 15) pour éliminer les effets affectant les techniques de transfert de temps de type "une voie".

La phase des signaux générés dans la composante spatiale (resp. dans le terminal sol) du MWL est asservie sur celle de l'horloge spatiale (resp. celle de l'horloge sol). Les mesures simultanées sur les signaux (en bande Ku) montant et descendant permettent d'éliminer la contribution de l'effet Doppler du premier ordre, le retard troposphérique et de nombreux retards instrumentaux. Le retard ionosphérique est éliminé en mesurant les mêmes

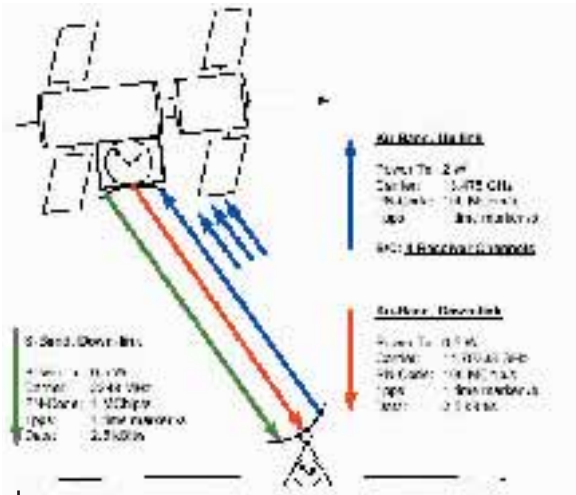


Figure 15 : Signaux échangés par le lien MWL d'ACES.

types de déphasage sur un signal descendant en bande S, permettant de déduire le contenu électronique total. Les mesures sont effectuées à la fois sur les phases des porteuses et sur les phases des codes pseudo-aléatoires (PRN), permettant ainsi d'effectuer des comparaisons de fréquence et de temps tout en levant l'ambiguïté de phase sur la mesure de la phase de la porteuse.

Le segment spatial du MWL inclut un boîtier électronique (dispositifs de comparaisons de phase et de temps, traitement du signal) et les antennes omni-directionnelles pour la bande Ku et la bande S. Le terminal sol inclut un boîtier électronique similaire à celui du segment spatial et une antenne parabolique directionnelle pointant la Station spatiale internationale au cours de son passage au-dessus de la station-sol. Dans le cadre du projet ACES, quatre utilisateurs sol peuvent se comparer simultanément à l'horloge bord en vue commune sur des canaux différents. La phase C/D instrument est en cours et un modèle d'ingénierie est prévu pour début 2006, permettant de démontrer la faisabilité du concept choisi et de vérifier que les performances correspondent aux attentes.

ACES démontrera les très hautes performances de l'horloge Pharaon ainsi que celles du lien MWL et effectuera une première génération de tests de physique fondamentale. De nombreux laboratoires sol contribueront à cette mission, mais sa durée limitée

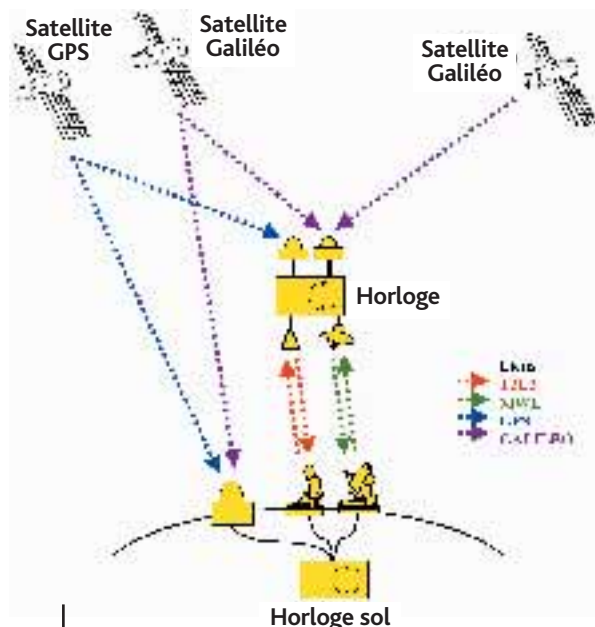


Figure 16 : Comparaisons sol-espace et espace-espace dans la mission T2L2M.

(18 mois - 3 ans) ne répond pas à la demande d'autres utilisateurs (concernés par la construction d'échelles de temps atomique, par la géodésie, etc.) qui ont besoin d'un système opérationnel permettant des mesures sur de plus longues durées.

Le projet T2L2M (Figure 16) est un projet post-ACES qui répond à ce besoin.

Dans ce projet, différentes techniques permettent de **comparer une horloge atomique**, embarquée à bord d'un satellite (altitude entre 600 et 800 km), **avec des horloges au sol et les horloges des satellites GPS ou Galiléo** :

- > comparaisons entre une horloge sol et les horloges des satellites GPS ou Galiléo par réception au sol des signaux provenant des satellites GNSS ;
- > comparaisons entre une horloge sol et l'horloge embarquée à bord du satellite T2L2M. Ces comparaisons sont effectuées soit grâce au lien optique T2L2, soit par le lien micro-ondes MWL. Le but est d'utiliser le même design d'instrument que celui choisi pour ACES, afin d'harmoniser les terminaux au sol pour les missions ACES et T2L2M. L'exactitude visée est de 50 ps et la stabilité temporelle de 200 fs sur 200 s et de 10 ps sur

10 jours. Le lien est capable de comparer deux horloges sol avec une incertitude en fréquence de quelques 10^{-15} sur un seul passage et de 10^{-17} sur la journée ;

- > comparaisons entre l'horloge embarquée à bord du satellite T2L2M et les horloges embarquées à bord des satellites GPS ou Galiléo par réception au niveau du satellite des signaux provenant des satellites GNSS.

Outre les objectifs de physique fondamentale déjà évoqués et la validation des effets systématiques utiles pour la télémétrie interplanétaire (Tipo), T2L2M apportera une contribution dans les domaines suivants :

- > **Systèmes GNSS de positionnement par satellites** : La possibilité d'effectuer simultanément des comparaisons entre l'horloge embarquée à bord du satellite T2L2M, des horloges sol et les horloges embarquées dans les satellites GPS ou Galiléo présente de nombreux avantages. Elle permet, d'une part, de mesurer plus précisément les retards troposphérique et ionosphérique et ainsi d'améliorer les modèles utilisés par GPS et Galiléo. D'autre part, le suivi des horloges GPS ou Galiléo directement depuis l'espace assure une mesure des horloges moins perturbée par l'atmosphère ainsi qu'une meilleure autonomie spatiale des systèmes de la composante GNSS. Dans le cas du bloc GPS 3, cette fonction est assurée par des communications directes entre les satellites GPS. Le concept T2L2M permettra d'offrir une fonctionnalité équivalente pour le système Galiléo, même si les satellites Galiléo ne peuvent pas communiquer directement entre eux.
- > **Géodésie spatiale** : L'intérêt de ce type de mission en géodésie spatiale est évident puisque le calcul de l'orbite du satellite T2L2M pourra être fait avec une incertitude réduite grâce aux corrélations entre les nombreuses mesures effectuées par des systèmes différents opérant à des fréquences très différentes. Ces mesures seront complémentaires de celles obtenues sur les satellites Champ ou Grace. De plus, les utilisateurs sol, membres du réseau de l'IGS, pourront améliorer la qualité de leurs mesures et la réduction des effets systématiques en recalant leurs mesures effectuées par GPS ou Galiléo avec les mesures T2L2 et MWL.

Atomes froids et senseurs inertiels atomiques

Par Philippe Bouyer et Arnaud Landragin

Interférométrie à atomes froids

L'interférométrie à atomes froids a suscité ces dernières années un intérêt tout particulier pour son application aux **capteurs inertiels**. En effet, ces nouveaux capteurs permettent une très bonne connaissance *a priori* du facteur d'échelle et aboutissent à une très bonne exactitude des appareils. De plus, le fonctionnement de ces capteurs repose sur des principes physiques fondamentaux : la mécanique quantique et, notamment, l'interaction atome/lumière. Cette "originalité" permet une compréhension très fine de leur fonctionnement, justifiant ainsi l'utilisation de ce type de capteurs dans la définition des grandeurs de référence (horloges atomiques et balance du Watt). Ces qualités sont non moins primordiales pour les tests de physique

fondamentale, notamment pour atteindre les niveaux de performance ultimes que requièrent les tests de la relativité générale. Néanmoins, l'utilisation de capteurs inertiels à atomes froids souffre d'une sévère limitation : la gravité. Cette accélération, bien qu'elle puisse être utilisée à bon escient dans des configurations similaires aux horloges en fontaine, limite le temps d'interrogation et donc directement la sensibilité de ces appareils. Leur utilisation dans l'espace permet de bénéficier de l'environnement 0-g et d'augmenter ainsi de plusieurs ordres de grandeur leur sensibilité. Ainsi, la sensibilité d'un accéléromètre croît comme le carré du temps d'interaction. On passe alors d'une durée typique de 100 ms sur Terre à plusieurs secondes, voire plusieurs dizaines de secondes. Pour ces temps d'interrogation conséquents, une autre limite peut apparaître. Par exemple, des atomes froids (de l'ordre de 1 μ K) s'étalent sur presque 10 cm après quelques secondes d'interrogation. L'exploitation du formidable potentiel de ces capteurs dans l'espace, demandant alors les temps d'interrogation maximaux, repose donc sur l'utilisation non plus d'atomes froids mais d'atomes ultra-froids comme les condensats de Bose-Einstein ou les lasers à atomes.



Hyper - Mission Esa (F2/F3)
Collaboration européenne
pilotee par Hanovre
Étude industrielle en 2002



Intérêts des atomes froids :
sensibilité exceptionnelle > systèmes optiques

Mesure absolue des grandeurs inertiels :
pas besoin d'intégrer continuellement le signal ;
la mission n'est pas mise en péril
si la mesure s'arrête pendant un instant.

Atomes "isolés" des perturbations externes :
très bonne référence inertielle ;
mesure relative entre lasers "ancrés"
au satellite et atomes en chute libre.

Figure 17 : Le projet Hyper. L'utilisation de deux gyromètres atomiques pointant dans deux directions orthogonales permet de mesurer le signal simultanément sur deux axes et donc de s'affranchir d'un nombre important d'effets systématiques. Chaque gyromètre est réalisé à partir de deux sources d'atomes froids lancées sur la même trajectoire, mais parcourues de façon opposée. Les sources atomiques, nommées pièges magnéto-optiques, et la technique de lancement sont très similaires à celles qui sont utilisées pour le projet Pharo.

Gyrométrie atomique : le projet européen Hyper

Le premier projet concret d'utilisation de capteurs inertiels à atomes froids dans l'espace a été soumis à l'Esa en 2000 sous la forme d'une proposition franco-anglo-allemande : le projet Hyper en réponse à l'appel d'offre sur les missions flexibles de l'Esa (Figure 17). Cette proposition s'articulait sur un test de relativité générale mesurant l'effet Lense-Thirring, qui correspond à un effet d'entraînement d'un référentiel local par une masse en rotation (la Terre dans notre cas). Le signal caractérisant l'effet Lense-Thirring est obtenu par la comparaison d'un signal de rotation local, provenant d'un ensemble de gyromètres à atomes froids, à un signal de rotation non local, donné par un télescope pointant une étoile supposée fixe dans le ciel. L'utilisation de gyromètres atomiques offrant une très grande sensibilité à court terme donnent accès aux modulations de cet effet lors de la rotation autour de la Terre. Un tel projet apporterait donc un complément d'information aux résultats potentiels du projet GPB de la Nasa, lancé en avril 2004, qui donnera accès à l'effet moyen sur la période de la mission (18 mois).

Le projet Hyper n'a pas été retenu comme mission flexible car la technique des senseurs atomiques semblait encore un peu "immature" pour être envoyée dans l'espace. Il a néanmoins suscité un fort intérêt et a fait l'objet d'une étude de faisabilité industrielle par l'Esa. Cette étude, réalisée en 2002-2003 par la société EADS-Astrium, a démontré

qu'une telle mission était faisable, même en l'état actuel des connaissances. Elle s'est essentiellement attachée à spécifier l'intégration des deux gyromètres atomiques avec le télescope et à montrer la faisabilité du système de contrôle d'attitude à traînée compensée.

Ces considérations ont déjà permis de pointer quelques développements technologiques importants en vue de missions futures. D'une part, il est nécessaire d'envisager la réalisation de sources laser puissantes et ultra-stables, le développement de bancs d'optique pour la génération de fréquences optiques en utilisant des technologies intégrées et l'amélioration des enceintes à vide et des blindages magnétiques. En supplément, d'importants efforts sont à fournir sur le satellite, certains efforts étant déjà engagés dans le cadre des projets Lisa-Pathfinder pour l'Esa et Microscope pour le Cnes.

Parallèlement aux études proprement spatiales, le développement d'un prototype sol est indispensable afin d'évaluer les performances et les limites de ces senseurs et d'aboutir à l'analyse des contraintes technologiques. Après les résultats pionniers du groupe de M. Kasevich aux États-Unis, une collaboration de laboratoires français (Syrte, LCFIO, LPL) a engagé l'étude d'un gyromètre à atomes froids (Figures 18 et 19) et a été suivie par l'équipe allemande partie prenante du programme Hyper.

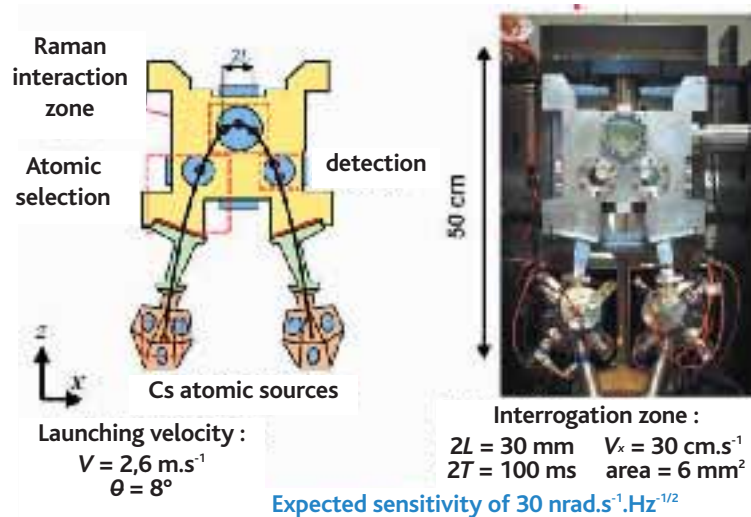


Figure 18 : Schéma du gyromètre du Syrte.

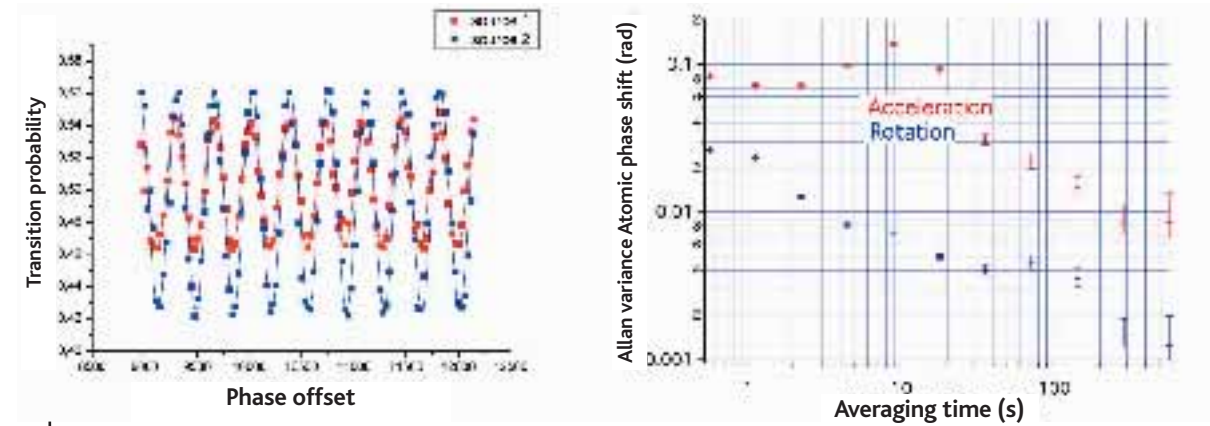


Figure 19 : Signaux d'interférence obtenus dans la configuration initiale du Gyromètre à onde de matière (GOM). Les paramètres de l'interféromètre sont un temps d'interaction de 60 ms et un taux de répétition de 1:560 ms⁻¹. L'augmentation du bruit vient des vibrations parasites sur l'expérience. En corrigeant ce problème de vibrations, principalement en installant une plateforme antivibratoire, il a été possible d'améliorer les performances de cet interféromètre en augmentant l'aire de près d'un ordre de grandeur. Le temps entre deux impulsions est passé de 20 ms à 60 ms. Ainsi, pour le signal de rotation (différence), le rapport signal à bruit était de 38, soit une sensibilité de $2,5 \times 10^{-6}$ rad.s⁻¹ en 1 seconde. Pour le signal d'accélération, la plus mauvaise réjection des déphasages parasites entraîne une baisse de contraste et un rapport signal à bruit réduit de 12, soit une sensibilité de $6,2 \times 10^{-6}$ m.s⁻² en 1 seconde.

Accélérométrie atomique : le projet français Ice

Les accéléromètres atomiques, qui n'ont pas été inclus dans Hyper, offrent aussi un fort potentiel et d'autres tests de physique fondamentale peuvent être envisagés. La configuration de ces capteurs est moins contraignante que celle des gyromètres car une seule source atomique au repos est nécessaire. Ceci permet de réduire considérablement le volume et la masse par rapport à un gyromètre, mais les longs temps d'interrogation accessibles dans l'espace demandent le développement de nouvelles sources atomiques "cohérentes". C'est le cas du projet Ice (Interféromètre à source cohérente pour l'espace) initié dès 2002 par une collaboration entre le Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'optique (LCFIO), le Syrte et l'Onera. Le but de ce projet est essentiellement de **prospector les futures possibilités de développer et d'utiliser des senseurs atomiques dans l'espace**. Dans un premier temps, une vérification du potentiel de ces senseurs peut être effectuée en mesurant la constante de structure fine α à l'aide d'un interféromètre atomique à source cohérente (Condensat de Bose-Einstein). Cette détermination repose sur la mesure de la vitesse (ou de l'énergie) de recul d'un atome de masse M lors de l'absorption d'un photon d'impulsion $h\mathbf{k}$. Cette mesure donne accès à h/M , qui peut être directement relié à la constante fondamentale α dont les meilleures

mesures (au niveau de 4 ppb) reposent sur la mesure de $g-2$. L'utilisation d'une source cohérente en micropesanteur permettra d'effectuer une mesure à mieux que 1 ppb et, donc, d'améliorer la connaissance de cette constante fondamentale, mais permettra également de vérifier l'unité de ces différents domaines de la physique. Une expérience sol, réalisée aux États-Unis et utilisant des atomes froids, a également été effectuée au niveau de 15 ppb. Dans cette expérience, on mesure successivement l'effet Doppler dû au recul dans deux directions opposées. Les principales limites sont liées, d'une part, au faible temps d'interrogation et, d'autre part, aux vibrations entre deux mesures successives, conduisant à un bruit d'échantillonnage important. L'utilisation d'un condensat de Bose-Einstein permet de s'affranchir de ce problème en mesurant simultanément dans les deux directions opposées. En micropesanteur, elle permet d'augmenter de façon très importante le temps d'interaction (un facteur 100) au profit de la diminution des effets systématiques. Une expérience très préliminaire a été réalisée au sol par le LCFIO.

Le projet Ice (Figure 20) a pour but d'effectuer des comparaisons entre les mesures accélérométriques effectuées par les senseurs inertiels atomiques et les senseurs classiques du type de ceux qui sont développés à l'Onera (Figure 21), offrant ainsi un test

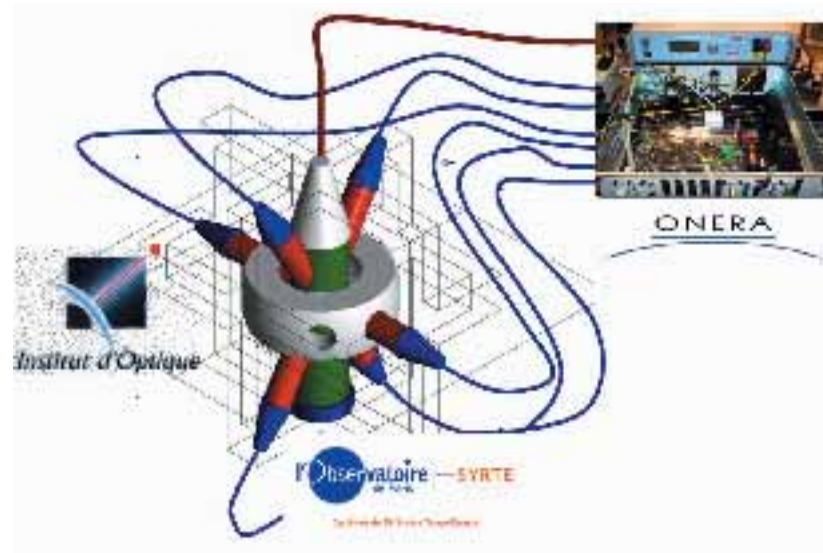


Figure 20 : Schéma du système de refroidissement du projet Ice. L'enceinte à vide sera développée au LCFIO, le système laser de refroidissement sera développé par l'Onera et la partie manipulation des ondes atomiques par le Syrte.

du principe d'équivalence, à performance limitée, entre un objet macroscopique et un objet microscopique. Pour effectuer ces mesures, on utilisera un dispositif d'interférométrie à ondes de matière fondé sur une source cohérente (laser à atomes). Ce dispositif, qui s'affranchit des problèmes d'échantillonnage des dispositifs classiques (horloges et gyromètres atomiques) puisqu'il effectue une mesure instantanée (*single shot*), atteindra ses performances (mesure à 0,1 ppb) en micropesanteur où des temps d'interrogations de 1 à 10 secondes seront possibles.

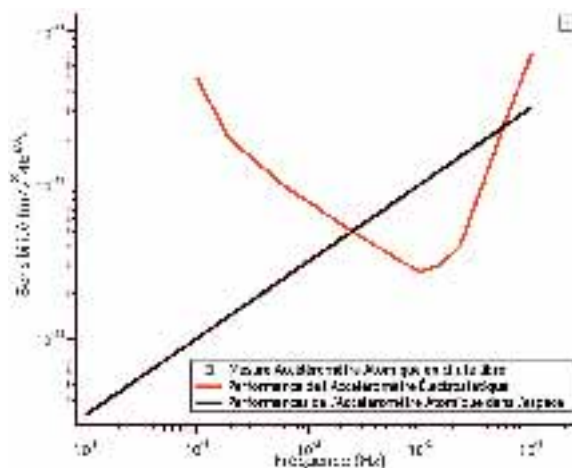


Figure 21 : Comparaison entre la sensibilité attendue d'un accéléromètre atomique à source cohérente utilisant un temps d'interaction de 10s (en noir) et la sensibilité des meilleurs accéléromètres électrostatiques développés à l'Onera (en rouge).

Ce projet permettra d'aboutir à la conception d'une source cohérente d'atomes (condensat de Bose-Einstein ou laser à atomes) spatialisable certainement indispensable pour les expériences d'interférométrie atomique dans l'espace. De plus, l'apparition récente de dispositifs compacts (en particulier les "puces atomiques") pourrait permettre d'envisager l'intégration de tels dispositifs dans des microsattellites ou des minisatellites.

Les deux technologies impliquées dans Ice apparaissent comme complémentaires car elles permettent une comparaison et, à terme, une mesure accélérométrique, à un niveau extrêmement fin sur une gamme de fréquence relativement large (trois ordres de grandeur). L'utilisation complémentaire de ces deux types d'accéléromètres pour des missions à grande distance permet d'envisager leur utilisation simultanément avec des méthodes de *ranging* conventionnel pour lever les ambiguïtés sur les anomalies de trajectoires des sondes de type Pioneer. L'utilisation d'accéléromètres exacts permettrait de mesurer à bord l'accélération moyenne sans besoin de modélisation des possibles forces appliquées sur le satellite.

Outre la démonstration de leurs performances et de leur utilisation dans la navigation spatiale de missions futures, les comparaisons entre ces deux types d'accéléromètres peuvent donner lieu à un test du principe d'équivalence entre un système classique et un système quantique au niveau du meilleur test

envisagé actuellement (Microscope). Parallèlement à ces projets spatiaux, des études sont menées au sol (dans les laboratoires LCFIO, Onera et Syrte) pour tester l'utilisation de sources cohérentes et la réalisation de gravimètres atomiques utilisant des sources d'atomes froids "traditionnelles". Dans un premier temps, on utilise la source cohérente d'atomes actuellement en développement dans le groupe d'optique atomique au LCFIO. Les deux faisceaux laser permettant la manipulation des ondes de matière sont construits par le Syrte pour obtenir une paire de faisceaux dont la différence de fréquence (typiquement quelques dizaines de kHz) sera ultra-précise. Enfin, la source laser spatialisable de l'Onera pourra être testée sur le dispositif.

Le contexte plus général des atomes froids dans l'espace

La plupart des missions énoncées ci-dessus demandent des performances qui, quoique potentiellement réalisables avec des systèmes "dupliqués" des dispositifs existants (utilisant des technologies similaires à Pharo), paraissent être à la limite de ces dispositifs. Il semble donc indispensable qu'en parallèle du développement technologique lié principalement à l'utilisation d'atomes froids, un effort soit lancé sur l'utilisation de senseurs inertiels de nouvelle génération utilisant des sources atomiques cohérentes (condensats de Bose-Einstein et laser à atomes). Les avantages de telles sources peuvent être nombreux. La taille de l'échantillon atomique peut être de quelques micromètres et l'on peut facilement réaliser des interféromètres d'aire importante avec un encombrement réduit, en utilisant de faibles vitesses longitudinales combinées avec des séparations importantes entre paquets d'ondes atomiques. La forte cohérence de ces sources permettra d'augmenter encore d'au moins un ordre de grandeur le temps d'interaction en conservant un très bon rapport signal à bruit. De plus, le nombre d'atomes accessibles (environ 10^6) permet d'obtenir un rapport signal à bruit de 1000 avec des techniques de détection classique et pourrait être amélioré en utilisant des états non classiques. Le projet Ice s'inscrit dans cette logique en projetant d'utiliser pour la première fois des lasers à atomes dans des senseurs inertiels.

Néanmoins, l'utilisation des condensats de Bose-Einstein exige un nouvel effort à la fois scientifique et technologique. Une première méthode consiste à

développer des électro-aimants puissants, utilisant par exemple des matériaux ferromagnétiques légers pour limiter le surplus de poids tout en nécessitant de faibles puissances électriques. Une autre méthode est fondée sur l'utilisation de dispositifs tout optique nécessitant le développement de faisceaux laser de puissance (plusieurs Watts) dans l'infrarouge pour utilisation dans l'espace. Il est intéressant de noter que la source puissante utilisable dans ce cas est compatible, par exemple, avec les besoins de Lisa (laser Yag à 1064 nm).

L'amélioration des techniques de production des condensats de Bose-Einstein, voire de leur production en continu, reste un problème ouvert que quelques laboratoires, dont le laboratoire Kastler-Brossel et le LCFIO en France, sont en train d'aborder dans des études sol.

Plus fondamentalement, les questions liées à la cohérence et à son maintien lors de l'évolution d'une superposition cohérente "macroscopique" restent très ouvertes et l'environnement de micropesanteur est particulièrement privilégié pour ce type d'étude, puisque les temps d'évolution accessibles sont nettement plus importants que sur Terre. On peut finalement mentionner d'autres aspects fondamentaux liés aux gaz quantiques dégénérés en micropesanteur. Ainsi, on peut envisager une réduction du record de température à quelques femtoKelvins, la limite de quelques centaines de picoKelvins atteinte sur Terre étant fondamentalement limitée par la nécessité de maintenir les atomes contre la gravité. La micropesanteur donne enfin accès à la création de structures "quantiques" complexes tridimensionnelles, qui pourraient être les précurseurs de futures générations de senseurs inertiels.

En parallèle au projet Ice, il existe donc une forte activité de la communauté scientifique internationale pour l'étude des gaz quantiques dégénérés en micropesanteur. D'une part, un projet allemand de réalisation d'un condensat dans la tour de Brême vient d'être initié par le DLR. D'autre part, l'Esa commence à s'intéresser fortement à cette nouvelle physique et affiche la thématique atomes froids parmi ses thèmes prioritaires, en particulier dans le cadre du programme Elips d'utilisation de la Station spatiale internationale.

Lisa et la détection des ondes gravitationnelles

Par Alain Brillet, Jean-Yves Vinet et Pierre Binétruy

Historique

Argument scientifique

Les interféromètres terrestres du type **Virgo** n'ont pas accès aux basses fréquences gravitationnelles (au dessous du Hz), en raison de la grande difficulté à isoler sismiquement les masses-tests dans ce domaine de fréquence. En fait, une telle isolation serait inutile, car elle n'empêcherait pas les couplages gravitationnels quasi-statiques (newtoniens) entre ces masses et les masses telluriques en mouvement. Le domaine des basses fréquences n'en reste pas moins très intéressant du point de vue astrophysique et, plus encore, du point de vue cosmologique. C'est en effet dans cette gamme de fréquence que l'on s'attend à trouver des signaux émis par les interactions dynamiques de **trous noirs massifs** d'une part, et tous les détails des mouvements des **étoiles binaires compactes** proches d'autre part. La relativité générale étant admise, on a là un laboratoire potentiel considérable et sûr (les binaires compactes existent et les trous noirs massifs aussi : on les a vus). Pour atteindre ces basses fréquences, il a été compris depuis longtemps qu'un détecteur spatial était nécessaire. Le projet qui correspond actuellement à ce besoin s'appelle **Lisa**. Il n'est pas concurrent mais complémentaire des interféromètres terrestres.

Évolution de la mission

Le concept initial d'antenne gravitationnelle spatiale est dû à Peter Bender (JILA) dans les années 1973-77. Un projet élaboré (Lagos) fut soumis à la Nasa sans succès dans les années 80. Dans les années 90, Peter Bender (JILA) et Ronald Hellings (JPL) se tournent simultanément vers l'Esa pour promouvoir leurs projets respectifs : Lisa pour P. Bender et Sagittarius, puis Omega pour R. Hellings, en demandant la caution des physiciens européens de Virgo et Geo. Lisa a déjà sa stratégie actuelle (six simples ou trois doubles stations en orbites héliocentriques aux trois sommets d'un triangle), tandis que Sagittarius propose six stations en orbites géocentriques. En décembre 1993, Lisa est proposée comme une mission "pierre angulaire"

dans le cadre des missions "Horizon 2000 Plus" de l'Esa, opérant une fusion entre les équipes de Lisa et Sagittarius. Comme le coût de la mission excède les ressources de l'Esa seule, il est proposé en 1997 de collaborer avec la Nasa. En 1998, l'état de définition des charges utiles est considéré comme suffisant pour amorcer la phase d'étude industrielle. À l'heure actuelle (2004) le lancement est projeté en 2013, la fusée Delta et les satellites étant fournis par la Nasa et les trois charges utiles par l'Esa. Le coût de la mission (300 M€) serait partagé pour moitié entre les deux agences. L'Esa prépare la mission de démonstration Smart-2 (Lisa-Pathfinder), vers 2008 (coût : 80 M€ pour l'Esa). Cette mission devrait emporter deux charges utiles indépendantes, l'une européenne, l'autre américaine, au point de Lagrange L1, en vue de tester indépendamment les technologies cruciales pour Lisa, à savoir les **accéléromètres**, les **bancs d'optique** et la **compensation de traînée**.

Les équipes

La partie européenne des scientifiques de Lisa se compose essentiellement des équipes anglo-saxonnes déjà associées dans Geo600, à savoir les Britanniques de Glasgow et Cardiff plus les deux groupes importants de Birmingham et du Rutherford Appleton, tous deux spécialisés en physique spatiale et les Allemands de Hanovre, de Garching et de l'Albert Einstein Institut (Golm/Potsdam). On doit adjoindre une participation italienne (Trente) et une participation française comprenant, jusqu'à aujourd'hui, d'une part, l'Onera, pour sa compétence reconnue en matière d'accéléromètres spatialisables et, d'autre part, l'Observatoire de Nice pour sa compétence en matière de stabilisation de lasers et d'analyse de données. La partie américaine comprend des équipes du *Jet propulsion laboratory* et du *Goddard space flight center* pour la Nasa, des universitaires de Stanford pour la technologie, et toutes les universités ayant un groupe compétent en théorie ou en analyse de données.

Principe de la mission

Description et bande de détection

Lisa comprend trois stations en orbites héliocentriques de rayon 1 UA, en retard de 20 jours sur la Terre. Les distances entre stations sont de 5 millions de km. Elles sont continûment connectées par des faisceaux optiques

infrarouges. Le principe consiste à mesurer en permanence les variations des distances réciproques en analysant le battement entre l'onde arrivant des stations éloignées et l'oscillateur local. Ces battements sont directement reliés (outre les bruits) aux émissions gravitationnelles. La sensibilité spectrale estimée a l'allure suivante (Figures 22 et 23) :

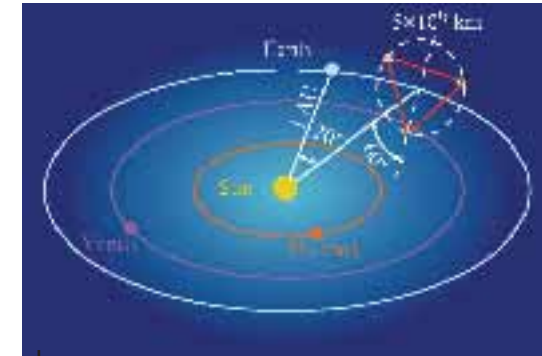


Figure 22 : Chaque station de Lisa contient deux lasers de 1W, en système de stabilisation et deux masses de référence.

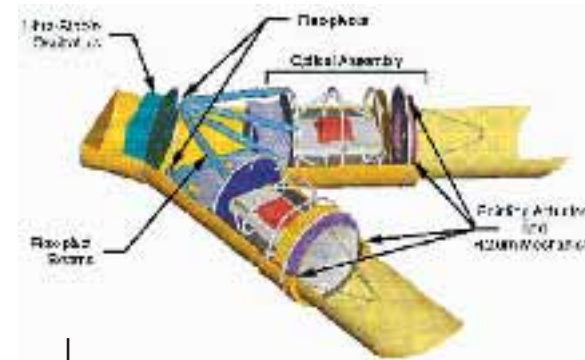


Figure 23 : La charge utile Lisa.

Physique avec Lisa

Lisa est un **laboratoire de relativité générale et un observatoire d'astrophysique relativiste**. Dans la bande de sensibilité prévue (Figure 24), on s'attend à voir affluer les signaux émis par les binaires compactes galactiques dont certaines sont d'ailleurs connues en détails, au point que la partie inférieure du spectre

doit être un bruit confus (qu'il faudra pouvoir résoudre) et, d'autre part, des événements transitoires produits par, et au voisinage des trous noirs de toutes masses de notre Galaxie et de ses voisines.

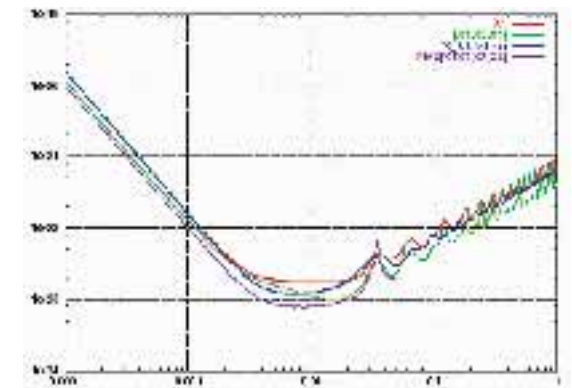


Figure 24 : Sensibilité spectrale de Lisa (amplitude de l'onde gravitationnelle en fonction de la fréquence : les différentes couleurs représentent diverses combinaisons de données).

Ces courbes sont obtenues en combinant, avec des retards bien choisis, les données élémentaires provenant des trois stations. Cette technique, qui permet d'éliminer les bruits de fréquence laser est dénommée *Time delay interferometry* (TDI), ou interférométrie digitale. Elle est essentielle dans le projet car elle seule peut ramener les spécifications sur le bruit de fréquence laser à des valeurs actuellement réalistes. Elle réalise des situations analogues à un interféromètre optique symétrique.

Son principe a été trouvé au JPL et sa formulation algébrique générale dans une collaboration franco-indienne OCA-IUCAA.

L'analyse des signaux des binaires compactes doit permettre de calibrer l'instrument, mais surtout de tester certains effets relativistes fins. Les événements impliquant des trous noirs forment par ailleurs une classe très riche de phénomènes en champ gravitationnel intense, comme par exemple les coalescences de trous noirs de masses comparables ou au contraire très différentes (la modélisation n'appelle pas les mêmes méthodes), les captures d'objets par des trous noirs, etc. Notre compréhension de la genèse des trous noirs supermassifs abrités par les galaxies bénéficiera des données recueillies.

État de la mission

Lisa-Pathfinder

Le principe d'une mission de tests technologiques (compensation de traînée, interférométrie) est acquis depuis des années sous les noms de Smart-2 puis Lisa-Pathfinder. Cette mission Esa comprend deux charges utiles : l'une DRS (*Disturbance reduction system*) est sous responsabilité du JPL, l'autre LTP (*Lisa test package*) est européenne. Elle doit pouvoir tester le système de compensation de traînée qui comprend, d'une part, essentiellement des accéléromètres (conçus par le groupe de Trente à partir des idées et de l'électronique de l'Onera) et, d'autre part, différents micropropulseurs, et des bancs d'interférométrie optique.

La mission Lisa-Pathfinder a été approuvée en novembre 2003. L'industriel contractant est Astrium Ltd (Royaume-Uni), filiale de EADS-Space. L'enveloppe globale de 160 M€ a été approuvée le 8 juin 2004 et le contrat avec Astrium Ltd signé le 23 juin. La charge utile doit être déposée au point de Lagrange L1 en utilisant un passage circum-lunaire. Le lanceur sera en principe une Delta 5, mais il existe une option pour un lancement depuis Baïkonour par une fusée Rocket.

Lisa

Une offre a été reçue d'Astrium Ltd. Le contrat proposé devait être soumis à l'*Industrial policy committee* le 28 septembre 2004.

Astrium Ltd prendra en charge le système de trois stations et les questions relatives au déroulement de la mission. Le contractant travaillera en étroite collaboration avec l'équipe homologue de la Nasa. Astrium Ltd apportera son soutien à l'Esa pour définir les éléments de la mission, les principes de modélisation, l'économie du budget d'erreur, l'évaluation des risques, le cahier des charges et tous autres éléments nécessaires pour discuter avec la Nasa du partage des responsabilités. Les discussions continuent avec la Nasa sur les principes du management en vue d'arriver à un schéma commun de management et à un cadre de coopération incluant tous les aspects de la mission.

Lisa-France

À la suite des recommandations du groupe "physique fondamentale" du Cnes, puis de la réflexion de prospective de la commission "Astroparticules" du CNRS (Cid-47), alertés par la faible participation scientifique de la France à cette mission, qui ne lui en coûtera pas moins une contribution financière importante, la communauté virtuellement intéressée par la technologie, l'astrophysique, le traitement des signaux de Lisa s'est rassemblée en une structure dénommée "Lisa-France", dont le responsable est Pierre Binétruy (Laboratoire Astroparticule et cosmologie (APC), président de la commission "Astroparticules"). Le principe en est de **coordonner une participation aux missions Lisa et associées**, ceci dans tous les domaines, et de fournir un interlocuteur légitime et compétent aux agences spatiales dispensatrices de moyens.

Les équipes

On trouve donc dans Lisa-France des ingénieurs (Onera), des expérimentateurs (métrologistes de Villeteuse, des Observatoires de Paris et de la Côte-d'Azur, APC, Laboratoire de physique subatomique et de cosmologie (LPSC) Grenoble), des analyseurs de données (Observatoire de la Côte-d'Azur (OCA), Laboratoire d'Annecy-le-vieux de physique des particules (LAPP)), des numériciens de la relativité générale des astrophysiciens (Observatoire de Paris-Meudon) et des théoriciens (Institut d'astrophysique de Paris (IAP), APC).

Prospective

Dans un premier temps, les deux actions urgentes à entreprendre sont :

- > l'insertion dans le système d'analyse de données qui se met en place dans Lisa et pour lequel le panorama reste très ouvert en Europe ;
- > une participation à Lisa-Pathfinder, qui permettra à la France de mieux identifier les problèmes technologiques associés à la mission Lisa et d'y participer ainsi plus efficacement. De ce point de vue, une réflexion est menée pour une contribution spécifique à Lisa-Pathfinder sous la forme de la réalisation du banc de modulation acousto-optique.

Par ailleurs, la redéfinition récente des objectifs de Lisa en sensibilité spectrale (élargissement à gauche vers 10^{-5} Hz et à droite vers 1 Hz) relance l'intérêt de travaux expérimentaux en métrologie (lasers stabilisés, accélérométrie).

Conclusions et recommandations

Ayant pour précurseur la mission Gravity Probe B, dont le satellite a été lancé en avril 2004, de nombreuses missions spatiales sont aujourd'hui proposées dans le domaine de la physique fondamentale afin de réaliser des tests extrêmement fins de la théorie de la gravitation. Pour la plupart, il s'agit bien sûr de mesurer avec une précision accrue les paramètres post newtoniens ou de mesurer directement, et avec toujours plus d'acuité, les effets prédits par la relativité générale comme, par exemple, le décalage de la fréquence des horloges, l'effet Lense-Thirring d'entraînement des repères inertiels, l'effet Shapiro de retard à la propagation dans le champ gravitationnel du Soleil, la propagation des ondes gravitationnelles, etc. Mais il ne faut pas perdre de vue qu'il s'agit, sur le fond, de rechercher des manifestations de nouvelles théories permettant d'unifier la physique et de lui donner une cohérence nouvelle et pour lesquelles il n'y a pas d'autre possibilité que d'explorer une frontière à la limite de notre savoir-faire instrumental.

Pour conclure, nous pouvons résumer l'ensemble de nos recommandations. Elles s'ajoutent évidemment à celle exprimées dans le paragraphe qui précède sur la participation essentielle de la France à Lisa et à Lisa-Pathfinder :

- > Il faut prévoir et préparer activement la **stratégie post Microscope**, soit sous la forme de nouveaux microsatellites, soit en participant à GeoSTEP ou à STEP.

- > Il faut mener **Pharao/ACES** jusqu'au bout, c'est-à-dire jusqu'à la démonstration spatiale du modèle de vol et en préparer l'exploitation future, avec entre autre, l'application à un Galiléo de deuxième génération. Il faudra pour cela développer les liens T2L2, MWL, T2L2M. On devrait donc réaliser rapidement une petite mission pour T2L2, soit sous forme de microsatellite, soit comme passager embarqué (phase 0/A).
- > Il est essentiel de poursuivre une R&T active dans le domaine **des atomes froids** : horloges optiques, senseurs inertiels, etc. Ceci devrait conduire à valider une mission de type Ice sur la tour de Brême par une étude Paso et à accompagner le programme atomes froids de l'Esa.
- > Il faut absolument suivre les missions en gestation sur l'**effet Pioneer** et y participer si possible.
- > Enfin, il est impératif de participer autant que possible, de façon bilatérale ou multilatérale, aux projets internationaux que sont **Optis, Astrod, Lator**. La main nous est tendue et nous avons tous les atouts nécessaires.

Tout ce programme suit la double logique qui consiste :

- > à exploiter au mieux notre savoir-faire durement acquis en matière de compensation de traînée, de senseurs inertiels, d'horloges et de liens à la fois comme outils pour l'exploration spatiale et comme briques technologiques élémentaires pour toutes les futures missions de physique fondamentale ;
- > à tirer le meilleur parti de chaque mission pour obtenir un résultat nouveau et significatif en matière de physique fondamentale.

Les auteurs tiennent à remercier, tout particulièrement, les membres du groupe de travail "physique fondamentale" du Cnes pour leur apport permanent à la réflexion menée sur ce domaine depuis plusieurs années et leur contribution à ce rapport de prospective.

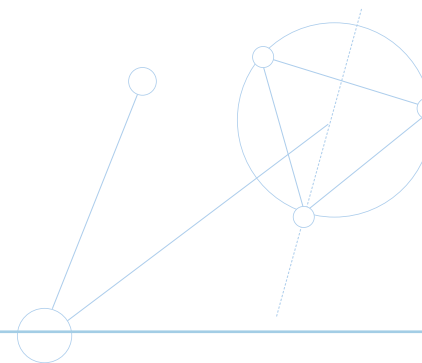




Image de Titan acquise par la sonde Cassini-Huygens le 26 octobre 2004. Explorer ce satellite de Saturne aujourd'hui, c'est un peu explorer notre propre planète il y a quatre milliards d'années, à l'eau liquide près...

©Nasa/JPL/Space science institute.

Introduction

L'exo/astrobiologie, l'étude de la vie dans l'Univers, inclut l'étude des conditions et des processus qui ont permis l'émergence du vivant sur notre planète et ont pu, ou pourraient, le permettre ailleurs. Elle englobe aussi l'étude de l'évolution de la matière organique vers des structures complexes et toutes les recherches relatives à la distribution et l'évolution de la vie sous toutes les formes qu'elle pourrait revêtir dans tout l'Univers. L'exo/astrobiologie est largement présente en France depuis plusieurs décennies. Une large communauté scientifique, rattachée à des disciplines classiques très différentes et parfois relativement

dispersée, travaille dans des domaines directement liés à l'exo/astrobiologie, qui fait partie depuis les années 1980 des thématiques soutenues par le Cnes.

Problématique scientifique

Pour présenter le domaine de recherche et les recommandations, nous avons choisi le fil conducteur de l'eau et de la matière organique, sous-tendu par la recherche d'une deuxième genèse de la vie. Cette recherche est déclinée selon trois grands chapitres

incluant des approches pluridisciplinaires, tant au sol que dans l'espace :

- > Les **ingrédients** de la vie primitive, placés dans leurs contextes géologique, planétaire et interstellaire, pour comprendre quand et comment la vie est apparue sur Terre, pour servir de référence.
- > La **chimie** des origines de la vie. Chimie prébiotique et émergence du vivant : des processus élémentaires aux mécanismes et structures complexes d'auto-réplication, pour servir de référence.
- > La **recherche de la vie extraterrestre** : biosignatures et applications à la recherche d'une vie ailleurs.

Les ingrédients de la vie primitive dans leur contexte géologique, planétaire et interstellaire

Comment caractériser le passage de la matière à la vie ?

Un certain nombre de molécules s'auto-assemblent dans l'eau et forment des structures moléculaires organisées capables d'assembler d'autres molécules pour générer des structures à leur image, produisant ainsi plus d'elles-mêmes par elles-mêmes. C'est l'**auto-reproduction**. Suite à de légères erreurs de montage, des systèmes moléculaires organisés plus aptes à se reproduire apparaissent et deviennent les espèces dominantes. C'est l'**évolution**. Auto-reproduction et évolution sont donc les deux fonctions qui caractérisent, *a minima*, le passage de la matière à la vie. Systèmes ouverts par définition, ces structures contiennent nécessairement une information chimique et sont nécessairement alimentées par un flux d'énergie et de matière.

Le berceau aqueux de la vie

La question des conditions physiques et chimiques qui régnaient dans l'environnement primitif de la Terre,

avant que la vie apparaisse, est fondamentale pour replacer la physico-chimie prébiotique terrestre dans des conditions réalistes. Dans ce domaine, du fait de l'absence de toute trace directe de ce qu'était cet environnement, **les questions sont nombreuses**. Quel a été quantitativement l'effet des processus de formation de la Lune sur l'atmosphère, sur le contenu en éléments volatiles de la planète, sur la composition chimique du manteau et de la croûte ? Quelles en ont été les implications sur la chimie prébiotique ? Le modèle du Soleil jeune faiblement lumineux est-il exact ? Quels étaient les flux de particules et de rayonnement et leurs spectres ? Y a-t-il eu un pic de bombardement vers 3,8-4,1 Ga (milliards d'années ou giga-années), dont l'arrêt aurait permis le démarrage de l'évolution chimique vers la vie ? Le concept de "dernier impact stérilisateur" est-il pertinent, en particulier si l'on envisage une biosphère souterraine ? La vie est-elle suffisamment facile à engendrer pour qu'elle ait pu apparaître et disparaître plusieurs fois dans l'histoire de la Terre ?

La **présence d'eau liquide en surface de la Terre**, à une température modérée, est une première étape indispensable pour l'apparition de la vie sur Terre. L'eau à l'état liquide est apparue très tôt dans l'histoire de la Terre, dès 50 à 100 Ma (millions d'années) après son accrétion. Quelques 50 Ma après, l'eau dégazée dans l'atmosphère s'est condensée pour former les océans. Au début de l'Archéen, il y a 4,0 Ga, les roches indiquent clairement la présence d'un océan stable. L'océan archéen était certainement plus acide et réduit que l'océan actuel, à cause de son équilibre avec une l'atmosphère très riche en CO₂, et sa chimie était dominée par Na et Cl, mais en concentrations plus fortes qu'actuellement, cela étant lié à un lessivage plus important des continents, à l'effet de l'hydrothermalisme sous-marin et à une probable faible interaction avec la biosphère naissante. Quant à l'**atmosphère**, différents modèles ont été proposés qui s'appuient sur des données astrophysiques, géologiques et géochimiques. On suppose aujourd'hui qu'une atmosphère secondaire, constituée principalement de CO₂ et N₂ s'est formée au cours du refroidissement de la planète grâce au volcanisme et par dégazage progressif du manteau. Un enjeu important est de déterminer pour cette atmosphère la part relative provenant du dégazage interne et celle d'origine extraterrestre. **Y a-t-il eu érosion de l'atmosphère par les impacts géants ?** Quelles ont été les compositions des diverses phases de l'atmosphère de la Terre primitive ?

* Laboratoire interuniversitaire des systèmes atmosphériques (Lisa).

Enfin, un autre paramètre fondamental consiste à déterminer quand sont apparus les **premiers continents émergés**, quelle était leur composition et quels étaient les mécanismes de leur genèse. En effet l'interface continent/océan est un des sites possibles pour l'apparition de la vie. De plus, l'existence de continents émergés permet l'isolement de micro-environnements (lacs, mares, etc.) éventuellement plus favorables à la concentration des composants prébiotiques, ce qui n'est pas le cas d'un vaste océan. La composition des océans dépend en grande partie de celle des continents, or nous savons que la croûte continentale avait une composition différente de la croûte actuelle, mais nous ne savons encore rien de la croûte hadéenne. Enfin, si aujourd'hui l'existence de continents émergés dépend étroitement de l'existence d'une tectonique des plaques, ce mécanisme était-il déjà opérationnel à l'Hadéen ? Les conditions de genèse de la croûte continentale archéenne permettaient-elles aussi son émergence et la création de reliefs ?

Divers sites peuvent être envisagés comme étant les plus favorables selon l'étape de l'évolution chimique puis biologique considérée. Les principaux sont :

- > **l'océan profond**, qui inclut les sources hydrothermales (fumeurs noirs et blancs), la surface des roches volcaniques et des sédiments ;
- > **la surface de l'océan**, milieu bidimensionnel facilitant la concentration des molécules et la production d'aérosols (gouttelettes) ayant le même effet ;
- > **la zone littorale et subaérienne**, autour de zones émergées de la croûte ou sur le flanc de volcans, avec des bassins et des lagunes, des alternances de phases sèches et humides (marées) ;
- > **les zones glacées**, dans lesquelles de l'eau liquide interstitielle peut être présente.

Recommandations : Établir de nouvelles contraintes sur la modélisation de la composition de l'atmosphère primitive. Développer des études (isotopes de O) sur les matériaux terrestres les plus anciens afin de confirmer ou d'infirmier la présence d'eau liquide dès cette époque. Préciser l'évolution temporelle des principaux paramètres, volume, température, pH, nature et abondance des sels de ces océans primitifs. Un point crucial à établir fermement est l'existence de continents

émergés sur la Terre hadéenne - l'apparition des premières terres émergées déterminant par leur lessivage l'évolution des caractéristiques de l'océan.

Origine des molécules organiques

En l'absence de trace directe des conditions qui régnaient dans l'environnement primitif terrestre il y a environ quatre milliards d'années, lorsque la chimie prébiotique a conduit aux premiers systèmes vivants, il est essentiel de rechercher et d'étudier des environnements terrestres et extraterrestres où des processus analogues se déroulent actuellement. De tels environnements doivent nous permettre de tester "sur le terrain" nos hypothèses sur l'origine de la vie et sur ces processus prébiotiques.

Origine endogène

> Origine atmosphérique : l'exemple de Titan

Bien que sa composition atmosphérique soit différente de celle proposée par les modèles de l'atmosphère primitive terrestre, Titan - le plus grand satellite de Saturne - présente de nombreuses analogies avec la Terre et est actuellement le siège de processus physiques et chimiques, en particulier d'intérêt prébiotique, similaires à ceux supposés sur la Terre primitive. **Explorer Titan aujourd'hui, c'est un peu explorer notre propre planète, il y a quatre milliards d'années, à l'eau liquide près.**

Les retours attendus de la mission **Cassini-Huygens** devraient, par synergie, être extrêmement riches en données essentielles pour notre compréhension de Titan, incluant les aspects exobiologiques (Raulin et Owen, 2002). Elles nécessitent le développement de nombreux programmes au sol, de modélisation théorique et surtout d'études expérimentales dont les données sont indispensables, notamment pour nourrir les modèles. C'est ainsi que, par exemple, les programmes d'établissement de base de données spectroscopiques (Infrarouge en particulier) développés par les équipes françaises (Bénilan, 2004) sont un atout considérable, ces données étant indispensables pour le traitement des futures données de CIRS et VIMS. Il en est de même des expériences

en laboratoire simulant les processus physiques et chimiques de l'atmosphère de Titan. Les études par plasma froid permettent de disposer d'analogues de laboratoire des phases gazeuses et solides de l'atmosphère réelle et d'en déduire des paramètres essentiels pour le traitement des données attendues de Cassini-Huygens (Ramirez et al, 2002 ; Bernard et al, 2003 ; Coll et al, 2003) (Figure 1).



Figure 1 : Simulation expérimentale de la chimie organique de l'atmosphère de Titan.

Les données de la mission Cassini-Huygens ne nous permettront très certainement pas de répondre à toutes les questions listées ci-dessus. C'est le cas, en particulier, de la question de la chiralité. Dès maintenant des projets de missions d'exploration post-Cassini-Huygens sont à l'étude afin d'effectuer l'exploration détaillée de la surface de Titan, avec analyse chimique, moléculaire et chirale des composés qui y sont présents. La communauté nationale est dès à présent sollicitée pour participer à ces projets.

Recommandations : Il est essentiel que la communauté planétologique et exobiologique française, qui s'est très fortement investie dans la mission Cassini-Huygens, puisse participer activement au dépouillement des données. Pour cela, il est aussi indispensable que la relève scientifique soit prévue, et ce sur plusieurs générations de chercheurs. En parallèle, il est indispensable que les études au sol, modélisations théoriques et expérimentales soient poursuivies et soutenues par le Cnes.

> Origine hydrothermale

Les événements hydrothermaux présentent un environnement réducteur favorable aux synthèses prébiotiques, car les gaz qui s'en échappent sont riches en hydrogène, azote, oxyde de carbone, dioxyde de carbone, méthane, anhydride sulfureux, hydrogène sulfuré, et l'énergie thermique est fournie en continu au système par le magma. Par exemple, les gaz qui s'échappent du système hydrothermal de Rainbow découvert par l'Ifremer au large des Açores renferment 45 % d'hydrogène et 43 % de monoxyde de carbone, une situation propice à la formation d'hydrocarbures par la réaction de Fischer-Tropsch. Des hydrocarbures comprenant entre 16 et 29 atomes de carbone ont été effectivement détectés dans ces fluides (Holm et Charlou, 2001). Pour l'Allemand Günter Wächtershäuser (1994), les molécules organiques primordiales se seraient formées au niveau de ces sources hydrothermales par réduction des oxydes de carbone grâce à la réaction de l'hydrogène sulfuré (H₂S) sur le sulfure de fer (FeS). En laboratoire, le sulfure de fer, l'hydrogène sulfuré et le dioxyde de carbone réagissent en milieu anaérobie pour donner de l'hydrogène et une variété de mercaptans dont le méthane-thiol, CH₃-SH. Le méthane-thiol et l'acide acétique ont également été obtenus à partir de monoxyde de carbone, d'hydrogène sulfuré, de sulfures de fer et de nickel et de quantités catalytiques de sélénium. Dans certaines conditions, il se forme des thioesters, qui ont peut-être constitué, selon le biologiste belge Christian de Duve, le principal moteur métabolique d'un monde vivant primitif de thioesters (de Duve, 1998).

Recommandations : les études relatives aux sources hydrothermales font aujourd'hui appel à une très large communauté, incluant microbiologistes, géologues, géochimistes et chimistes. Elles peuvent aussi fournir des informations précieuses sur des environnements extraterrestres (Mars, Europe) et des analogues de ces environnements. Elles concernent donc aussi l'exploration planétaire et doivent être considérées comme élément de la prospective du Cnes.

Origine extraterrestre

La période de bombardements intenses de la Terre primitive, jusqu'à environ - 3,8 milliards d'années, a probablement apporté des quantités importantes

de matériaux extraterrestres sur notre planète. Ainsi, **météorites, micrométéorites, comètes et poussières cométaires ont pu participer à l'origine à la chimie prébiotique**. Les constituants du milieu interstellaire, s'ils ont été suffisamment préservés durant les processus d'accrétion lors de la formation du système solaire, ont pu aussi y contribuer.

> **Météorites, micrométéorites et comètes**

Plus de 500 molécules ont été identifiées dans la météorite de type chondrite carbonée Murchison, parmi lesquelles plus de 80 acides aminés, dont huit sont des constituants des protéines et des bases nucléiques intervenant dans l'ADN et l'ARN. L'inventaire cométaire est moins bien connu, mais comprend, d'une part, de nombreuses petites molécules réactives importantes pour la chimie prébiotique (HCN, H₂CO, CH₃CN, HNCO, etc.) et des molécules plus complexes comme la formamide NH₂CHO et l'éthylène glycol CH₂OH-CH₂OH et, d'autre part, une matière organique réfractaire encore mystérieuse, qui peut comporter des polymères ou co-polymères des petites molécules précitées, et peut-être de la matière carbonée "insoluble" analogue à celle des météorites.

Tout ou partie de ces molécules pourraient provenir de la riche chimie du milieu interstellaire, où plus de 120 espèces sont recensées, la majorité organiques, parmi lesquelles toutes les molécules connues dans les comètes, d'autres plus complexes encore (cyanopolynes HCnN, CH₃COOH, et peut-être – mais la détection est encore sujette à débat – la glycine NH₂CH₂COOH). Là aussi, il reste à déterminer quantitativement la part respective de la chimie du corps parent, de la nébuleuse et du nuage interstellaire initial dans l'origine des molécules des comètes et des astéroïdes.

Les comètes se sont formées en même temps que le système solaire mais, contrairement aux planètes, elles ont probablement conservé intact le matériau qui composait la nébuleuse solaire, voire celui du nuage moléculaire qui a conduit à la formation de notre système planétaire. On les considère à ce titre comme des "archives" **témoignant des conditions physico-chimiques qui régnaient il y a 4,6 milliards d'années**. Toutes les observations tendent à montrer une grande diversité et complexité dans leur composition moléculaire, faisant d'elles un terrain d'études exobiologiques de tout premier ordre.

Grâce à **Rosetta**, pour la première fois, nous disposerons d'informations directes concernant la composition moléculaire du noyau des comètes. En particulier sur sa composante organique réfractaire qui n'est, à ce jour, connue qu'au travers de simulations de laboratoire et grâce à quelques mesures non spécifiques en spectrométrie de masse directe de grains cométaires, attestant de la présence de composés de poids moléculaires élevés. Avec Rosetta, nous saurons beaucoup mieux jusqu'où peut aller la complexité de ce matériau réfractaire et **dans quelle mesure les comètes, par l'apport de briques prébiotiques plus ou moins complexes, ont pu contribuer à l'apparition de la vie sur la Terre**. De façon générale, il est indispensable de dresser un inventaire plus complet de la richesse chimique des petits corps astéroïdes et comètes, et des fragments qui en sont issus et sont à l'origine des météores, des bolides, des poussières interplanétaires stratosphériques (SIDP), des météorites et des micrométéorites.

Recommandations : Dans le cadre de la préparation à l'interprétation des résultats de la mission Rosetta, si les composés les plus légers sont à ce jour bien caractérisés, beaucoup de travail reste encore à faire en ce qui concerne l'analyse par spectroscopie ou chromatographie des mélanges des molécules les plus complexes. Ceci nécessite l'établissement de bases de données de spectres ou de chromatogrammes (après pyrolyse) de mélanges de molécules de poids moléculaires élevés potentiellement présents sur les comètes. Là encore, il est essentiel que les moyens au sol accompagnent le traitement des données spatiales attendues dans dix ans. De plus, afin de cerner plus spécifiquement les liens entre les comètes et l'origine de la vie, l'étude de la possibilité d'importation de molécules cométaires sur Terre (survie lors des impacts et/ou apport par micrométéorites) et de leur évolution en phase aqueuse doit compléter ce travail d'accompagnement à la mission Rosetta. Enfin, de façon générale, la collecte et l'étude de matériaux extraterrestres d'origine cométaire et météoritique, domaines dans lesquels la communauté française a acquis une très forte compétence, doivent être soutenues.

> **Origine extraterrestre de l'homochiralité biologique**

Pour comprendre l'excès d'acides aminés gauche mesuré dans différentes chondrites carbonées,

des films solides d'acides aminés sous les deux configurations (D) et (L) ont été irradiés avec un rayonnement synchrotron polarisé circulairement à droite et à gauche. Après photodécomposition d'environ 70 % du matériel de départ, un excès énantiomérique (%D-%L) d'environ 2 % a été observé. Des programmes analogues sont en préparation, au sol et dans l'espace (Expose), pour des études plus systématiques de ces processus. Cette approche originale et déjà riche en résultats est à encourager (Figure 2).

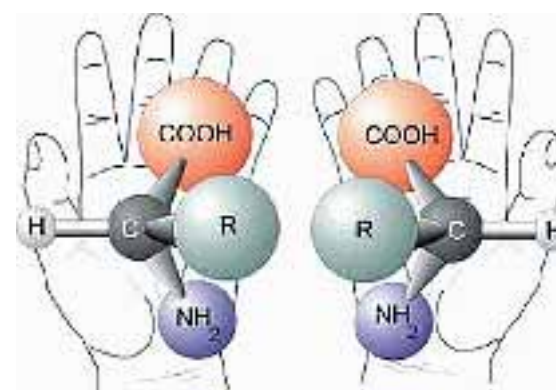


Figure 2 : La chiralité.

En parallèle, l'étude de la chiralité et de la possibilité d'homochiralité dans des environnements extraterrestres est une autre approche en fort développement, avec l'opportunité de missions spatiales pouvant embarquer une instrumentation capable d'effectuer des mesures chirales. C'est le cas de Rosetta dont l'instrument Cosac (Rosenbauer et al, 1999 ; Szopa et al, 2003) à bord de son atterrisseur inclut des colonnes de chromatographie en phase gazeuse permettant la séparation d'énantiomères. Cosac **devrait ainsi fournir dans dix ans la première mesure in situ de chiralité dans un noyau cométaire**. Les prochaines missions d'intérêt exo/astrobiologique vers Mars devraient inclure ce même type d'instrumentation. Toutefois, son utilisation nécessite encore des développements technologiques pour la préparation de l'échantillon et la dérivation chimique des molécules réfractaires potentiellement présentes, afin de les rendre volatiles et analysables par techniques de GC-MS (Gas chromatography - Mass spectrometry) ou équivalentes.

> **Chimie du milieu interstellaire**

L'étude de la chimie du milieu interstellaire, en particulier par approche expérimentale et modélisation (détermination des propriétés physico-chimiques, en particulier spectrales de molécules interstellaires d'intérêt prébiotique ; expériences de simulation en laboratoire et en orbite basse) apparaît comme un aspect très important des études exo/astrobiologiques (Munoz Caro et al, 2002). Avec la mission **Stardust**, l'analyse d'échantillons de poussières interstellaires devrait connaître un développement très important dans les années à venir. Elle va nécessiter l'étude et la mise au point de techniques d'analyse physico-chimique d'échantillons de très petite taille. De nouvelles expériences spatiales succédant à Stardust seraient à envisager dans un futur proche.

> **Transport spatial**

Des acides aminés ont été exposés aux conditions de l'espace pendant quinze jours à bord de deux capsules automatiques russes Photon et pendant trois mois à bord de la station Mir. Les acides aminés ont été exposés seuls mais aussi enrobés dans différentes matériaux minéraux : une argile, une poudre de basalte et une poudre de météorite. Après trois mois en orbite terrestre, les acides aminés ont été détruits à hauteur de 50 % en l'absence de protection minérale. À épaisseur égale, c'est la poudre de météorite qui a présenté le meilleur pouvoir protecteur. La poudre météoritique protège efficacement à partir d'une épaisseur de 5 µm démontrant **que toute micrométéorite de taille supérieure à 5 µm constitue un transporteur spatial efficace pour les acides aminés** (Boillot et al, 2002) (Figure 3).

Recommandations : De façon générale, des expériences d'irradiation de matériaux organiques dans les conditions extrêmes doivent être développées pour une meilleure compréhension de l'évolution de la matière organique dans des environnements extraterrestres (allant du milieu interstellaire à l'environnement de Mars, de Titan et des comètes). La Station spatiale internationale et l'instrument Expose qui devrait être installé sur le module européen Columbus sont tout particulièrement adaptés à la poursuite des expériences initiées sur Mir et les capsules Photon.



Figure 3 : Expérience d'exo/astrobiologie au cours de la mission Persée à bord de la station orbitale Mir.

La chimie des origines de la vie : des processus élémentaires aux mécanismes et structures complexes d'auto-réplication

La piste cellulaire

La cellule est la plus petite unité du vivant contemporain. Elle est constituée de molécules porteuses d'information génétique (les ADN et les ARN) capables de se répliquer, de transmettre cette information à la génération suivante : les **acides nucléiques**. L'autre grande classe de molécules, les **protéines**, assure la plupart des processus métaboliques ainsi que la structure cellulaire et les mouvements intra et extracellulaires. Dans une cellule vivante, l'intérieur est séparé du milieu aqueux extérieur par une membrane constituée par des agrégats de lipides. À partir des petites molécules organiques, les chimistes se sont efforcés de reconstituer en laboratoire les trois familles de biopolymères indispensables au fonctionnement de la cellule. Ils ont plus ou moins réussi à reconstituer deux des trois familles de molécules et ont montré que l'eau joue un rôle déterminant de solvant et de réactif chimique. Par exemple, ils ont obtenu des mini-protéines dans l'eau

sur des surfaces minérales, en présence ou en absence d'activateur chimique exogène (Bertrand et al, 2001 ; Maurel et Orgel, 2000 ; Huber et al, 2003). Par contre, ils n'ont pas encore réussi à reconstituer ARN et ADN, et en particulier le sucre ribose (le b-D-ribofuranose) qui forme le squelette de l'ARN (Figure 4). De ce fait, la synthèse spontanée de l'ARN dans les conditions de la Terre primitive apparaît comme très difficile, donc peu probable. Dans ces conditions, il est difficile d'envisager l'apparition spontanée et simultanée aux origines de la vie de ces trois catégories de molécules très différentes les unes des autres.

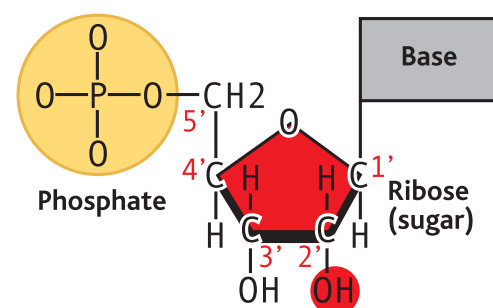


Figure 4 : L'ARN et son ribose.

Le monde ARN

L'existence d'Acides ribonucléiques (ARN) catalyseurs, appelés ribozymes, capables à la fois de porter une information génétique et d'exercer une activité catalytique permet d'envisager l'existence passée d'un monde ARN qui aurait précédé le monde cellulaire à ADN-protéines contemporains (Gilbert, 1986 ; Gesteland et al, 1999). De nombreux éléments structuraux et métaboliques renforcent aujourd'hui cette hypothèse d'un monde ARN précurseur (Joyce, 2002 ; Maurel et Haenni, 2004). La démonstration récente que l'étape clé de la formation de la liaison peptidique au cours de la biosynthèse des protéines est réalisée par catalyse de l'ARN sans intervention quelconque d'un acide aminé confirme l'existence probable d'un monde d'ARN ancestral. Grâce à la méthode SELEX (Selection of ligand by exponential enrichment), il est même possible de mimer l'évolution darwinienne à l'échelle moléculaire et d'étendre considérablement le spectre d'activité catalytique des ARN. Ces derniers auraient pu ainsi jouer le rôle de catalyseurs primitifs au côté de mini-protéines faciles à synthétiser dans des conditions prébiotiques (Meli et al, 2003).

L'un des problèmes les plus difficiles à résoudre est la production expérimentale du premier brin d'ARN à partir duquel ont pu émerger les ribozymes. Des travaux très innovants proposent que les acides nucléiques actuels aient été précédés par des analogues, des succédanés, des ARN véritables Systèmes génétiques alternatifs (AGS). Toute une panoplie de molécules plausibles, proches des ARN biologiques, sont aujourd'hui disponibles pour lesquels il faut tester la compatibilité "prébiotique" et leur pertinence dans des conditions interstellaires. Par exemple, les travaux d'Eschenmoser (synthèse de *Threose nucleic acid* (TNA), 2004) et de Ricardo et al (stabilisation du ribose en présence de borate, 2004) constituent de nouvelles pistes très prometteuses.

Les systèmes auto-catalytiques précurseurs de l'ARN

Le monde de l'ARN a constitué vraisemblablement un épisode dans l'histoire de la vie. Reste maintenant à comprendre la formation prébiotique de l'ARN qui n'a trouvé, à ce jour, aucune explication

convaincante. Il est raisonnable de penser que l'émergence du monde de l'ARN a été préparée par des systèmes plus simples capables de croissance autocatalytique, d'évolution et de brisure de symétrie chirale.

Auto-organisation moléculaire

La complexité du vivant repose sur une organisation moléculaire qui met en jeu des régulations, des contrôles et des architectures que l'on commence à peine à appréhender à partir de quelques systèmes modèles. Les travaux consacrés à l'étude de l'auto-organisation sont souvent conduits en collaboration avec des physiciens. Ils impliquent des modélisations informatiques qui pourraient fournir des pistes de recherche expérimentale où la compréhension de comportements inconnus observés *in situ*, par exemple au cours de l'exploration spatiale.

Enfin, construire une protocellule ou une cellule minimale devient aujourd'hui le but de nombreux laboratoires. Que ce soit par le biais de l'encapsulation des principaux ingrédients du métabolisme dans des vésicules phospholipidiques (Luisi et Walde, 2000 ; Chakrabarti et al, 1994 ; Deamer, 1997), ou par le biais de couplages entre les activités de molécules d'ARN liées à de l'argile et la compartimentation (Hanczyc et al, 2003), les travaux expérimentaux sont de plus en plus nombreux et doivent être encouragés au sein de la communauté exobiologiste. Les formes ancestrales de vie sur Terre ou sur Mars, ou sur tout autre objet planétaire, sont probablement toutes passées par un stade cellulaire.

Recommandations : Le Cnes devrait veiller avec les autres organismes de recherche à favoriser les échanges entre les communautés concernées par les aspects suivants :

- > Recherche de systèmes autocatalytiques actifs sur des surfaces minérales dans l'eau.
- > Compréhension des premières brisures de symétrie conduisant à l'homochiralité du vivant.
- > Sélection d'ARN capables d'exercer les actes catalytiques indispensables aux premières voies métaboliques.

Recherche de la vie extraterrestre : biosignatures et application à la recherche d'une vie ailleurs

Biosignatures et détection de vie

Le but est d'établir une procédure permettant d'identifier sans ambiguïté l'existence de formes de vie actives, endormies ou passées dans des échantillons extraterrestres, à partir d'un ensemble de données chimiques, biochimiques, physiques ou structurales. Cette procédure doit être transposable à tous les types de mission : retour d'échantillons, envoi de sondes automatiques, missions habitées. Cette procédure doit fournir une "boîte à outils" robuste pour la recherche de biosignatures.

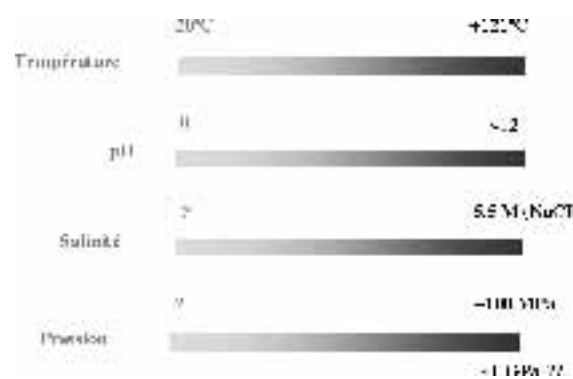


Figure 5 : Limites physiologiques et physico-chimiques connues du vivant sur Terre.

Dans cette démarche, il est évident que l'étude de la vie terrestre, y compris dans les **milieux extrêmes**, fournit une référence indispensable non seulement pour circonscrire les possibilités du vivant, aussi bien au niveau fonctionnel que structural, mais aussi pour appréhender ses contraintes vitales et ses limites (Rothschild & Mancinelli, 2001). Une hypothèse ambitieuse de travail pour l'exo/astrobiologie est de considérer la vie terrestre comme un cas particulier, une solution locale et transitoire parmi l'éventail de possibilités du vivant (Figure 5).

Distinguer l'inerte du vivant ou de ses traces

La distinction de l'inerte (minéral ou organique) du vivant (organique) semble *a priori* évidente lorsque des structures cristallines, organiques ou cellulaires sont reconnaissables à grande échelle. En revanche, si l'échelle d'observation et d'analyse diminue, la frontière entre les deux mondes devient plus floue, surtout par manque de référence : un prion (protéine chaperonne) est-il vivant ? De plus, si cette distinction entre phases minérales et entités vivantes est relativement évidente *in vivo*, les processus de fossilisation et de minéralisation *post mortem* l'estompent progressivement et rendent incertaine l'identification des structures vivantes passées (Brasier et al, 2002). On connaît, en effet, des structures minérales ou organo-minérales abiotiques qui ressemblent à des cellules fossiles et qui empêchent l'identification univoque des premières traces de vie dans les roches terrestres les plus anciennes et la recherche des biosignatures d'une vie passée. Cette question devient cruciale pour la recherche d'une vie éventuelle passée ou présente sur Mars par exemple. En effet, dans le contexte géologique martien noachian, il y a une forte probabilité de recueillir, au cours des missions d'exploration, des informations structurales et chimiques (si elles existent) concernant un monde prébiotique organique ou organo-minéral inconnu sur Terre ayant pu engendrer ses propres entités cellulaires. Pour distinguer l'inerte du vivant, ou identifier les traces de ce dernier, il faudra donc disposer de modèles généraux de la vie, s'appuyant, notamment, sur deux propriétés principales du vivant : catalyse et information (structurale, chimique, etc.) et tenant compte de l'équilibre subtil entre les potentialités du vivant et les contraintes imposées par son environnement immédiat (écosystème).

Les biosignatures probables

D'un point de vue pratique, on peut envisager de distinguer trois types de biosignatures : structurales,

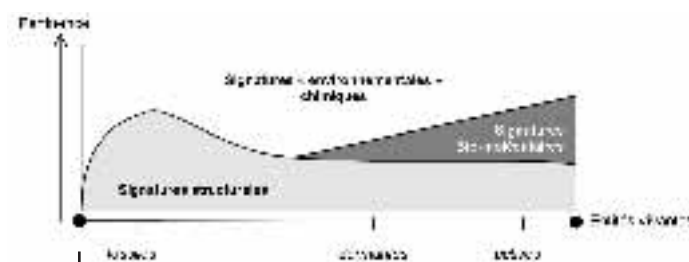


Figure 6 : Pertinence des différents types de biosignatures en fonction de l'état des entités vivantes.

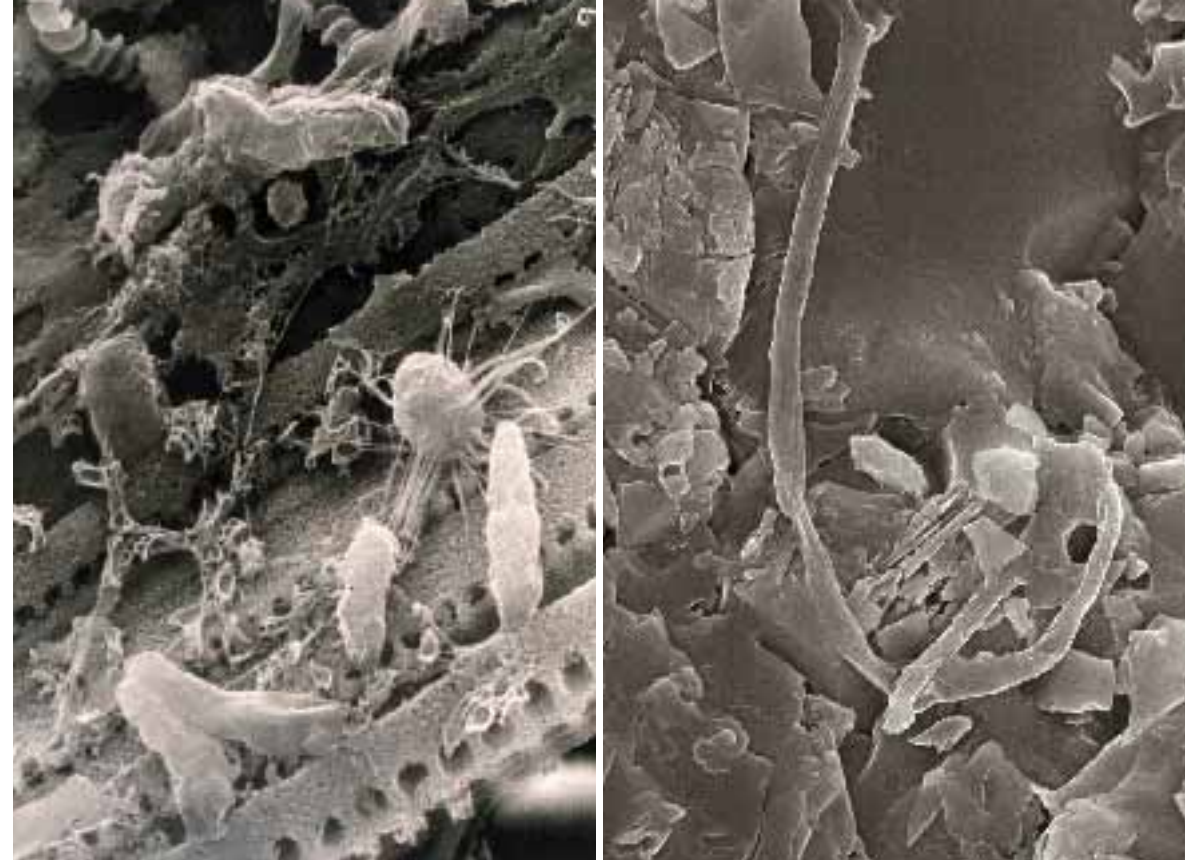


Figure 7 : Exemple de structures de bactéries récentes, à gauche, et fossiles (3,5 giga-années) à droite.

chimiques et biochimiques. Celles-ci ont deux origines possibles : directe ou indirecte, c'est-à-dire associée directement (structure et chimie d'un fossile par exemple) ou indirectement (par exemple minéralisation ou corrosion induite par la forme vivante dans un environnement minéral) à la forme vivante (Figure 6).

> Signatures morphologiques, directes et indirectes

Actuellement, il existe plusieurs séries de critères morphologiques pour l'identification des cellules vivantes transposables à des microfossiles. Ces critères sont nécessairement différents selon le type d'organismes recherchés et caractérisent des aspects différents de l'individu, de la colonie ou du biofilm. (Schopf et Walter, 1983 ; Buick, 1990 ; Westall, 1999 ; Westall et al, 2000) (Figure 7).

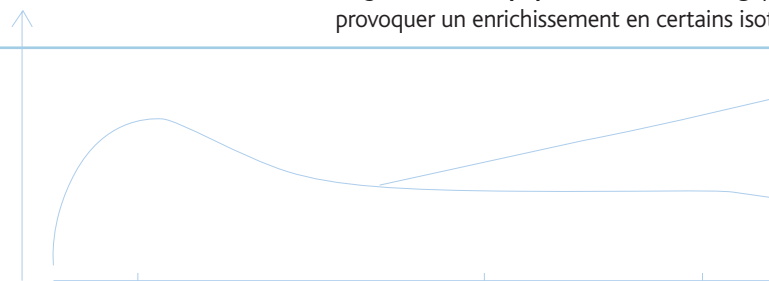
L'apparition de figures de biocorrosion ou de biominéralisation peut être aussi une indication indirecte d'activité vivante. En raison de leur mode de genèse très locale (au voisinage immédiat du micro-organisme), certaines de ces biotransformations minérales diffèrent de celles produites par des processus purement chimiques plus globaux (Ehrlich, 1998 ; Berthelin, 1985 ; Marion et al, 1991 ; Mustin et al, 1992 ; Fisk et al, 1998).

> Signatures chimiques

- **Signatures organiques** : La matière organique biogénique se dégrade pendant les processus de fossilisation, de diagenèse et de métamorphisme, ce qui rend caduque l'utilisation de tests chimiques hautement spécifiques (coloration, tests de métabolisme, analyses génétiques). Aujourd'hui, les seules signatures organiques fiables sont les biomarqueurs lipidiques issus de la dégradation chimique et thermique de composés spécifiques des parois (Brocks et al, 1999, Summons et al, 1999).

- **Signatures minérales** : Dans certaines conditions physico-chimiques, des processus biologiques d'oxydoréduction produisent des minéraux secondaires stables (carbonates, silices, sulfures/sulfates, oxydes de fer et de manganèse) possédant des structures cristallographiques particulières (habitus, symétrie, stœchiométrie). D'autres peuvent correspondre à des intermédiaires réactionnels spécifiques et complexes (rouilles vertes, oxyde de Mn(III)) (Barker et al, 1998 ; Kalinowski et al, 2000).

- **Signatures isotopiques** : L'activité biologique peut provoquer un enrichissement en certains isotopes



légers, ^{12}C , ^{14}N ou ^{32}S par exemple (Hayes et al, 1983 ; Schidlowski, 1988 ; Beaumont et Robert, 1999 ; Shen et al, 2001). Il est aussi envisageable d'utiliser d'autres traceurs (Fe, Mg, Mn) indiquant des transformations minérales biocatalysées (Brantley et al, 2001). Toutefois, lorsque les éléments ne sont pas suffisamment assimilés, il est difficile de démontrer le caractère univoque de tels traceurs vis-à-vis des processus biologiques et de ceux purement physico-chimiques, un processus biologique n'étant jamais indépendant des conditions physico-chimiques extérieures.

> Signatures biochimiques et énergétiques

Il y a un grand nombre de signatures moléculaires potentielles envisageables pour la détection de la vie. Elles sont toutes très autoréférentes par rapport au modèle terrestre et peuvent générer également un grand nombre de faux positifs et de faux négatifs. Au niveau de l'écosystème (macro-échelle ou de constructions macroscopiques détectables) ou à l'échelle cellulaire (micrométrique) ces signatures comprennent la production de gaz (oxygène, méthane), de pigmentations particulières (fluorescence), de dégagements de chaleur, de réactions redox ou d'activités catalytiques non conformes en termes d'intensité et de qualité aux prédictions de codes chimiques, la détection de macromolécules à haute spécificité (réplication, reconnaissance), l'amplification PCR de marqueurs moléculaires (gènes structuraux ou de métabolisme conservés), des mises en culture dans des milieux spécifiques associant des sources d'énergie et des nutriments disponibles *in situ*.

Recommandations :

Pour chaque biosignature, il est essentiel de déterminer :

- > la pertinence contextuelle de l'identification, tenant compte en particulier des caractéristiques physiques, chimiques, géologiques de l'environnement immédiat de la biosignature ;
- > la fiabilité des méthodes employés et leur robustesse ;
- > les limites de détection et incertitudes inhérentes à l'échantillonnage.

De plus, comme il n'existe pas de signature universelle, il est aussi indispensable de croiser les biosignatures.

À la recherche d'une vie extraterrestre

Mars

Les observations faites par les missions martiennes Mariner 9, Viking 1 et 2, Mars Pathfinder, Mars Global Surveyor, Odyssey, Mer (Opportunity & Spirit) et Mars Express indiquent clairement que Mars a connu dans sa jeunesse de l'eau à sa surface de manière permanente. La présence permanente d'eau suppose une température plus clémente qu'aujourd'hui, température atteinte probablement grâce à l'existence d'une atmosphère dense générant un effet de serre important. Grâce à cette atmosphère, la planète a pu accumuler des micrométéorites à sa surface, à l'instar de la Terre. En 1976, les deux sondes Viking ne détectèrent ni molécules organiques ni vie à la surface de Mars sur une profondeur de quelques centimètres.

En fait, le sol martien semble renfermer des oxydants puissants produits par le rayonnement solaire dans l'atmosphère et/ou par des processus photochimiques au niveau du sol. La présence d'oxydants exclut toute accumulation de molécules organiques à la surface de la planète. On dispose cependant aujourd'hui de 28 météorites ignées qui proviennent très probablement de Mars. Ce sont les météorites SNC, dont la fameuse météorite ALH 84001, supposée renfermer des nanobactéries martiennes fossilisées. Cette affirmation est aujourd'hui battue en brèche.

Dans l'expérience Stone, des météorites artificielles ont été enchâssés dans le bouclier thermique d'un satellite Photon pour voir si des roches sédimentaires, plus aptes à contenir des fossiles, résistaient à l'entrée atmosphérique. Une fraction de la dolomie (un carbonate de calcium et de magnésium) résista à l'entrée atmosphérique, suggérant que la Terre pourrait abriter certaines météorites martiennes sédimentaires (Brack et al, 2002).

En tout état de cause, certaines des météorites SNC renferment des molécules organiques martiennes. Les ingrédients qui ont permis l'apparition de la vie sur Terre étaient rassemblés sur Mars. Il est dès lors tentant de penser qu'une vie élémentaire de type terrestre ait pu apparaître et se développer sur la planète rouge. Elle pourrait y être encore présente,

comme le suggère d'ailleurs la détection très récente de traces de méthane dans l'atmosphère.

La présence passée d'eau étant avérée à la surface de Mars, il est impératif d'y confirmer la présence des molécules organiques. La mission *Mars science laboratory* de la Nasa le fera en 2009 tandis que l'Esa prépare ce type d'exploration dans le cadre de la mission ExoMars du programme Aurora prévue également pour être lancée en 2009. Beagle 2, l'atterrisseur exobiologique de **Mars Express** aurait dû procéder à l'analyse de la matière organique dès 2004, mais il est resté obstinément muet depuis sa séparation de l'orbiteur, le 19 décembre 2003.

Europe

Europe, le satellite de Jupiter, pourrait bien présenter des environnements marins ressemblant aux sources sous-marines terrestres. Europe est le plus petit des satellites galiléens de Jupiter avec un rayon légèrement inférieur à celui de la Lune. Il orbite à une distance d'environ 600 000 kilomètres de Jupiter, donc suffisamment près pour être réchauffé par l'effet de marée dû au champ gravitationnel très important de la planète géante.

En 1979 et 1980, la mission Voyager avait déjà photographié Europe et montré que sa surface était recouverte par de la glace entaillée de profondes crevasses. Depuis, le vaisseau spatial **Galiléo** a fourni

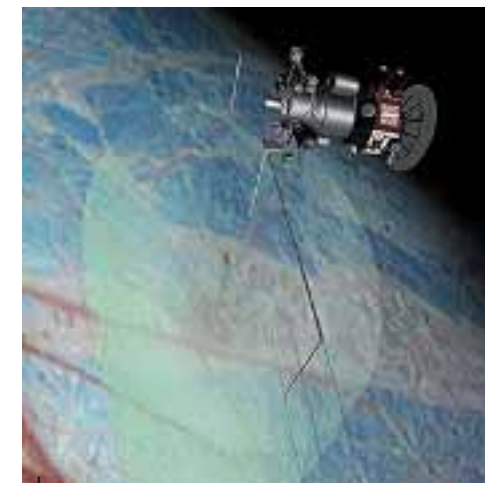


Figure 8-a : Exploration extérieure
©F. Raulin - Cnes



de très belles images, montrant notamment des blocs de glace ayant pivoté sur eux-mêmes. La surface présente peu de cratères d'impacts, ce qui suggère un remodelage continu par des phénomènes cryovolcaniques ou tectoniques. Selon l'un des modèles de structure interne proposé, il y aurait un océan d'eau liquide sous quelques kilomètres de banquise (Figures 8-a et 8-b), la chaleur nécessaire au maintien de l'eau à l'état liquide étant apportée par les fortes marées internes. La surface présente également des stries en forme d'arcs, interprétées comme provenant d'un stress dû à des marées océaniques sous-glaciaires. Des dépôts de sels ont été observés à la surface d'Europe par spectroscopie dans le proche infrarouge, dépôts qui pourraient provenir de remontées d'eau océanique salée. Enfin, Galiléo a enregistré récemment un champ magnétique induit dans le champ magnétique de Jupiter traduisant la présence d'un conducteur électrique. L'océan d'eau salée pourrait très bien jouer ce rôle de conducteur électrique.

Toutes ces observations plaident en faveur de l'existence d'un océan sous-glaciaire d'eau salée. Il est maintenant important de savoir s'il existe sur Europe un magma capable de transférer la chaleur du cœur planétaire vers le fond océanique pour créer des sources hydrothermales et générer une chimie organique complexe. L'énergie de marée induite par Jupiter est-elle suffisante pour fondre les silicates

Recherche de la vie extraterrestre.
Recherche de biosignatures sur Europe.



Figure 8-b : Exploration intérieure
©F. Raulin - Cnes

à des températures supérieures à 1 200°C ? La mise en évidence d'un magma sur Europe fait partie des objectifs prioritaires de l'exploration actuellement à l'étude. Si Europe a maintenu une activité de marée et une activité hydrothermale sous-glaciaire, une vie bactérienne a pu y apparaître et y est peut-être encore active aujourd'hui. Europe apparaît de plus en plus comme un lieu privilégié du système solaire pouvant héberger de l'eau liquide et une vie bactérienne en activité.

Recommandation : Mars tout d'abord, puis Europe, sont les deux objets prioritaires du système solaire pour la recherche d'une vie extraterrestre présente ou passée. Les futures missions vers Mars devront inclure dans leurs objectifs cette recherche. Une large communauté en France est prête à y participer, qu'il s'agisse d'une mission d'Esa, Nasa ou d'une mission conjointe. Un soutien du Cnes dans ce domaine est indispensable. Il en est de même en ce qui concerne l'exploration exobiologique d'Europe.

Recherche de vie en dehors du système solaire : exoplanètes

Pour la première fois nous avons la perspective d'obtenir un début de *réponse objective* à une question posée depuis l'Antiquité grecque : "Sommes nous seuls dans l'Univers ?". En 1995, le sujet est passé brutalement du domaine de la spéculation à celui de l'observation. La découverte de la première planète exoplanète autour d'une étoile de type solaire, par Michel Mayor et Didier Queloz à l'Observatoire de Haute-Provence, a lancé la recherche de la vie au delà du système solaire, avec une approche que l'on peut qualifier de "pas-à-pas" :

- (1) y a-t-il des planètes géantes autour des autres étoiles ? Nous sommes en train d'y apporter une réponse clairement positive ;
- (2) y a-t-il des planètes telluriques ?
- (3) certaines d'entre-elles sont-elles habitables, voire habitées ?

La première question (1), concernant la recherche de planètes telluriques, devrait obtenir une réponse dans les prochaines années. Les missions **Corot** (lancement prévu en 2006), puis **Kepler** (2008), seront capables de détecter de telles planètes et d'en déterminer le rayon. Le troisième objectif (3), celui de la caractérisation de leur surface et de leur atmosphère, nécessitera une détection directe et l'analyse

spectroscopique des photons émis par l'exoplanète. Ce sont les objectifs des missions **Darwin** et **TPF**.

Il suffit de réfléchir au nombre considérable d'étoiles dans notre propre galaxie ($\sim 2 \cdot 10^{11}$) pour se rendre compte d'une part de l'immensité de la tâche et, d'autre part, de la richesse extrême du domaine. L'Europe a eu un rôle pionnier dans ce domaine (proposition Darwin en 1993, découverte de la première exoplanète autour d'une étoile de type solaire en 1995, mission Corot prévue pour 2006) et se doit de continuer à jouer un rôle précurseur.

> Le couple carbone-eau est-il privilégié ?

L'essentiel des recherches sur la vie extra-terrestre se concentre sur celle d'une vie analogue à que nous la connaissons sur Terre, c'est-à-dire basée sur la **chimie du carbone en solution dans l'eau**. La question se pose immédiatement : ce faisant, ne réduit-on pas gravement le domaine d'investigation ? Ne faisons-nous pas preuve d'un **géocentrisme** étroit ? En fait, il est possible de montrer que la chimie du carbone en solution dans l'eau représente une solution particulièrement favorable pour la vie (Owen, 1980). Ce n'est donc probablement pas par un simple accident que ce soit le cas de la vie sur Terre. Notre connaissance actuelle n'est certainement pas suffisante pour pouvoir exclure que d'autres systèmes chimiques opèrent dans certaines conditions. Cependant, notre compréhension actuelle des conditions nécessaires à la vie, des abondances cosmiques et de la chimie qui opère dans le milieu interstellaire et à la surface des planètes semblent bien nous conduire à privilégier le couple **carbone-eau**.

> Les signatures d'un monde habitable et d'un monde habité

Un monde **habitable** (condition nécessaire, mais non suffisante, pour être un monde où la vie peut se développer) doit contenir de l'eau liquide pendant au moins une période de la journée et de l'année locale. Or, si cette eau est à la surface de la planète, elle donne une pression partielle de H_2O dans l'atmosphère qui est détectable à distance, car elle donne des bandes d'absorption caractéristiques, en infrarouge thermique et en infrarouge proche. Nous avons donc la possibilité de déterminer si une planète est habitable par spectroscopie de la lumière qu'elle émet/réfléchit (Figure 9).

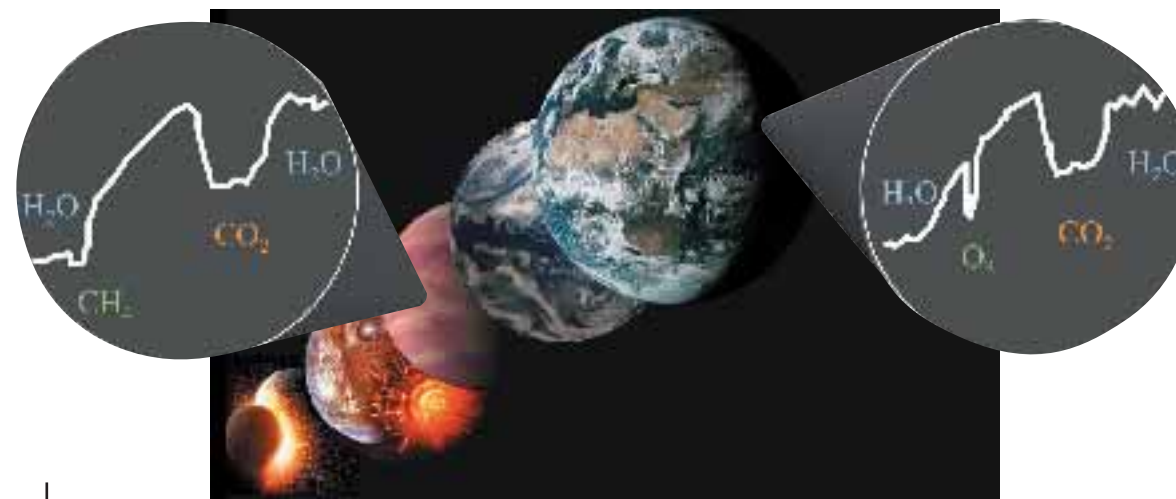
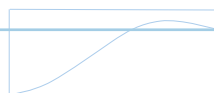


Figure 9 : Recherche de la vie extraterrestre hors du système solaire (exoplanètes, habitabilité, biomarqueurs). Recommandation : soutien à des missions de type Darwin (mesures spectroscopiques).

©F. Raulin - Cnes

Qu'en est-il de la détection de vie effective (planète **habitée**) ? Existe-t-il de véritables biosignatures, c'est-à-dire un indice qui révèle la présence d'une vie et n'a pas de faux positifs ? La question des faux négatifs est moins grave. En fait, ils sont même inévitables. Il suffit de penser à une vie qui se serait développée dans des niches écologiques très réduites et quasiment indétectables pour s'en convaincre.

À ce jour, nous ne connaissons pas de biosignature "absolue" pouvant être détectée à distance. Le seul

critère utilisable est l'observation d'un ensemble gaz atmosphériques que l'on ne parvient pas à produire, par modélisation, avec les différents processus physico-chimiques, abiotiques, que l'on connaît. Ainsi dans le cas où l'atmosphère d'une exoplanète tellurique possède des pressions partielles de H_2O , CO_2 et O_3 dans des gammes de valeurs adéquates et si cette planète est située dans la zone habitable de son étoile, il semble bien que cela indique la présence d'une activité biologique locale (Selsis et al, 2002 ; Selsis et al, 2004). Pour une étoile de type solaire, cette production ne semble possible que par

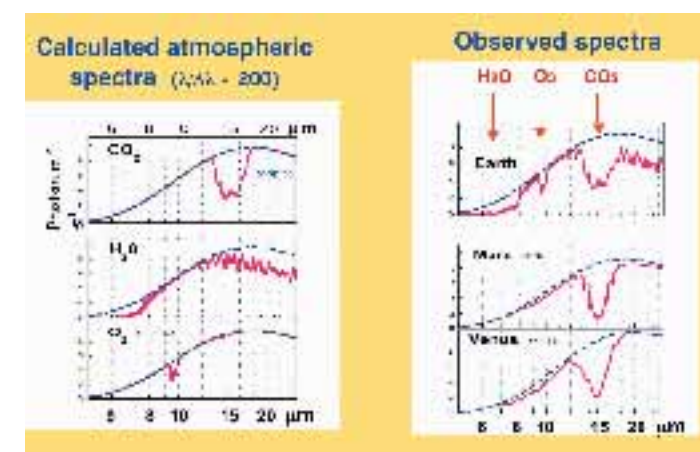
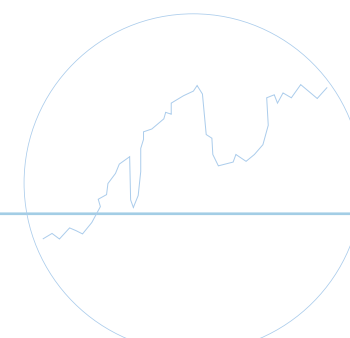


Figure 10 : Signatures infrarouges de CO_2 , H_2O et O_3 et leur contributions dans le spectre infrarouge des atmosphères de planètes telluriques.



photosynthèse. Or, celle-ci implique l'action d'un être vivant tellement elle nécessite une machinerie complexe (dans le cas des chloroplastes, sur Terre, il faut absorber et stocker 8 photons visibles pour effectuer une étape de réduction élémentaire) (Figure 10).

Or, les trois composés CO_2 , H_2O et O_3 ont des bandes actives en infrarouge thermique (6 – 20 μm). L'étude spectroscopique de la lumière de la planète permet donc d'en déterminer la présence et l'abondance. Ces composés ont aussi des signatures dans les domaines UV, visible et proche infrarouge, où la planète réfléchit de façon sélective la lumière de son étoile. Toutefois, pour avoir l'ensemble des informations nécessaires à identifier la biosignature, il faut pouvoir faire les mesures spectroscopiques sur un très large domaine spectral (0,25 – 2,5 μm) qu'il est difficile de couvrir dans sa totalité.

Recommandations : Soutien à des missions de type Darwin et/ou TPF dont l'objectif est précisément de parvenir à faire cette spectroscopie afin de savoir si, parmi les nombreuses exoplanètes telluriques que l'on ne manquera pas de découvrir, certaines sont habitables ou habitées.

Moyens d'accès à l'espace et programmation des missions

Moyens d'accès à l'espace

Plateformes en orbite terrestre

L'étude de l'évolution de la matière organique ou de matériaux ou d'échantillons biologiques dans l'espace nécessite l'accès à des plateformes en orbite basse. Le programme **Expose** a été accepté par l'Esa avec le soutien du Cnes, pour un vol sur la Station spatiale internationale. Il serait important de développer ce type d'approche afin de généraliser ces études, tout en les couplant à des études analogues au sol utilisant les "facilités" terrestres existantes (DLR en particulier).

Missions d'exploration planétaire

L'importance exobiologique de Mars et Europe, déjà soulignée à plusieurs reprises dans ce document, nécessite un véritable programme international d'exploration de ces deux corps.

> Mars

En ce qui concerne Mars, seule la mission Viking a jusqu'à présent exploré la surface de Mars en y recherchant des traces de vie et de matière organique. La mission Mars Express nous fournit actuellement des données inestimables dont beaucoup ont un impact exobiologique. Toutefois, du fait de l'échec de la partie Beagle 2 de la mission, les informations sur la présence de biosignatures et de composés organiques à la surface et dans le sol seront quasi inexistantes. Dans le domaine de l'exo/astrobiologie, il est à présent essentiel que les futures missions vers Mars aient la capacité d'explorer le sous-sol (forage), avec un choix approprié de sites d'exploration. Dans ce domaine, les questions de protection planétaire (voir plus loin) sont aussi essentielles (Figure 11).

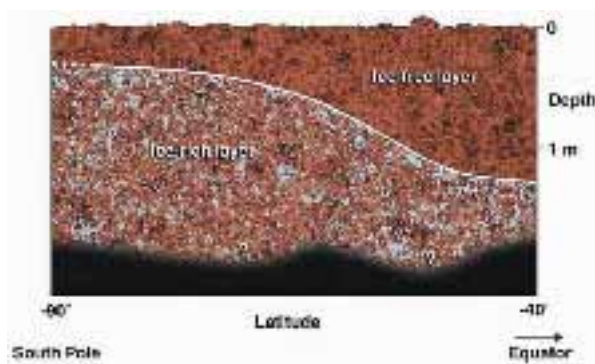


Figure 11 : Les futures missions d'exploration exobiologique de Mars devront permettre la collecte d'échantillons prélevés en profondeur (1 m ou plus).

L'appel à propositions lancé par la Nasa dans le cadre de MSL ouvre des possibilités à moyen terme pour les scientifiques français susceptibles d'être associés aux propositions. Il est important qu'ils soient soutenus par le Cnes, afin que ces opportunités aient une chance de se concrétiser. De même, le projet Exomars de l'Esa dans le cadre du programme Aurora, malgré un calendrier peu réaliste, pourrait être une opportunité pour l'Europe de développer un programme d'exploration exobiologique ambitieux de la planète rouge. Il conviendrait toutefois

que les directions de l'Esa concernées travaillent ensemble de façon harmonieuse, en apportant leurs compétences complémentaires dans un tel programme. Ce n'est apparemment pas le cas actuellement, au grand dam de la communauté, en particulier exobiologique, européenne. Il nous semble important que les États-membres, en particulier leurs agences spatiales, fassent passer un message dans ce sens à la direction générale de l'Esa. Le Cnes a certainement un rôle clé à jouer dans ce domaine.

> Europe

En ce qui concerne Europe, malgré de nombreuses recommandations de la communauté planétologique et exobiologique, y compris la visite d'une délégation de scientifiques auprès de la direction du *Space Science Directorate*, la possibilité d'une mission d'exploration du satellite galiléen dans les dix ans qui viennent n'a pas été considérée par l'Esa. L'importance d'une telle mission sera à nouveau soulignée dans les réponses propositions envoyées au *Space Science Directorate*, en réponse à son appel à thème pour le programme *Cosmic vision*. En parallèle, il serait important - s'il en est encore temps - pour les scientifiques français, qu'ils puissent participer à la mission américaine Jimo et/ou aux missions concernant Europe envisagées par la Nasa à plus long terme.

> Comètes et Titan

Plusieurs projets d'exploration cométaire sont en préparation, pour proposition à la Nasa. L'étude de la nature et de l'évolution de la matière organique dans l'environnement cométaire et sur le noyau reste une question exobiologique importante. Les projets avec retour sur Terre d'échantillons cométaires devraient conduire à des données essentielles sur la composition chimique, moléculaire et chirale du noyau, très complémentaires de celles attendues de la mission Rosetta. La participation de la communauté scientifique française à ces projets doit être soutenue par le Cnes.

Il en est de même des projets d'exploration post-Cassini-Huygens de Titan, qui sont dès maintenant à l'étude et qui devraient permettre de répondre à de nombreuses questions exobiologiques auxquelles Cassini-Huygens ne pourra répondre, comme la présence d'une chiralité dans la chimie organique de Titan ou la complexité de cette chimie dans la sub-surface du satellite.

Vol en formation

La communauté exobiologique française soutient fortement le projet Darwin (ou sa fusion avec TPF), qui devrait permettre de rechercher des biosignatures spectrales dans l'atmosphère des exoplanètes de type tellurique. De nombreux exobiologistes français participent à ce projet et certains y jouent un rôle important.

Le développement des vols en formation pour application de l'interférométrie à grandes distances à l'étude des exoplanètes est donc à soutenir.

Aspects technologiques

Dans la perspective des futures missions d'exploration planétaire *in situ* d'intérêt exobiologique, le développement d'instrumentation d'analyse exobiologique couplée à l'instrumentation géologique, chimique et physique, pour l'exploration de corps susceptibles d'avoir abrité la vie, ou même de l'abriter encore aujourd'hui (Mars et Europe), est indispensable. C'est tout particulièrement le cas pour :

> L'instrumentation de mesure in situ :

- > mesure de chiralité par séparation et analyse quantitative d'énantiomères : développement de techniques spatialisées de chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse avec dérivation chimique, de HPLC et/ou de micro-électrophorèse capillaire ;
- > analyse moléculaire quantitative de composés organiques complexes ;
- > instrumentation de microbiologie et de biologie moléculaire.

> Les mesures en laboratoire

Dans la perspective de retour d'échantillons extraterrestres (Stardust, futures missions MSR et équivalentes cométaires), il est essentiel de développer des techniques d'analyse chimique, isotopique, moléculaire et chirale adaptées à l'étude de très petits échantillons. Les études déjà effectuées sur les micrométéorites illustrent parfaitement la difficulté de telles analyses.

L'exemple encore récent du programme Premier du Cnes montre que la communauté française



concernée, au-delà de celle déjà liée à la recherche spatiale, peut se mobiliser de façon large et travailler en étroite coopération. Il est sans doute encore temps de remotiver cette communauté.

> **Détectabilité des biosignatures**

Pour optimiser la recherche de formes de vie dans des échantillons extraterrestres, l'instrumentation doit être capable de :

- > détecter une biomasse faible viable, dormante ou fossilisée,
- > détecter des formes de vie autres que celle que nous connaissons sur Terre,
- > ôter rapidement toute ambiguïté sur l'origine des corps observés (probabilité vivant/inerte).

> **Détectabilité globale par analyse chimique ou biochimique**

Si l'on veut détecter une entité de type "bactérien" (ex : cellule d'1 μm de diamètre contenant 70 % eau) par gramme d'échantillon, il faut être capable de détecter, par gramme d'échantillon, environ 6.10^{-15} moles de carbone organique, 8.10^{-14} g de protéine, 3.10^{-14} g d'acide nucléique. Compte tenu de l'hétérogénéité probable des échantillons, des effets de matrice et des prises d'essais analytiques minimales, il est nécessaire d'amener la limite de dosabilité des constituants majeurs (e.g C, N) au environ de la femtomole/gramme d'échantillons. Ce constat doit aider à mieux définir les capacités de traitements et le dimensionnement (durée de vie, stratégie de collecte, etc.) des plateformes d'analyses embarquées et dédiées à la détection de biosignatures.

> **Détectabilité par analyse locale : approche statistique**

Pour des grains de densité moyenne ($\approx 3 \text{ g.cm}^{-3}$) et d'une taille comprise entre 10 et 100 μm , l'observation reproductible de 10 à 100 bactéries/grain exige une densité bactérienne voisine de 10^7 à 10^8 bactéries/gramme, densité habituellement observée dans des sols terrestres actifs. En effet, on peut considérer que les densités bactériennes communément observées dans des systèmes terrestres sont de l'ordre de :

- > 10^{10} - 10^{12} bact.g⁻¹ pour les milieux naturels très actifs ou les bioréacteurs artificiels contenant des biofilms ;

- > 10^6 - 10^9 bact.g⁻¹ dans des sols continentaux fertiles riches en matières organiques ou des sédiments marins actifs (marges littorales) ;
- > 10^3 - 10^4 bact.g⁻¹ dans des roches ou des sédiments anciens pauvres en matières organiques (marnes du Toarcien par exemple).

Or, cette densité bactérienne ($\approx 10^8$ bactéries/gramme) correspond seulement à un taux de recouvrement statistique de la surface minérale par les micro organismes d'environ 1 %. Ainsi, dans un environnement peu propice, la probabilité de détecter de manière reproductible une entité vivante microscopique sur un grain minéral est infime. Les meilleures chances d'identification résident donc dans une approche systématique et statistique si la distribution est homogène (nombre de grains à observer / densité cellulaire supposée) et sur l'opportunité de trouver des niches écologiques riches définies *a priori* par les critères d'habitabilité et le choix des sites d'atterrissage.

Le problème de la protection planétaire

L'exo/astrobiologie est directement concernée par les problèmes de protection planétaire dans la mesure où il faut impérativement éviter de transférer sur la cible (Mars, Europe, etc.) des micro-organismes terrestres susceptibles d'interférer avec les mesures exobiologiques (présence et survie à court terme), produisant ainsi des faux positifs. Ceci est particulièrement important pour toutes les mesures nécessitant une amplification du signal (PCR par exemple), ou une observation ponctuelle (microscopie). Ceci est également vrai pour les missions de retour d'échantillons sur Terre, le retour de micro-organismes terrestres ayant survécu au voyage aller-retour risquant de faire apparaître de faux positifs lors de l'analyse des échantillons.

Conclusions et recommandations

L'abondance microbienne dans les échantillons extraterrestres sera faible. De plus, ces échantillons à analyser seront disponibles en faible quantité. Il est donc important pour le Cnes et les organismes partenaire de favoriser les études en recherche et développement capables de diminuer le seuil de détection pour toutes les techniques d'analyse des biosignatures.

Le Cnes devra encourager la poursuivre de l'exploration microbiologique des milieux terrestres extrêmes dans le but d'augmenter les références en utilisant ces techniques optimisées. Les micro-organismes extrémophiles, adaptés aux valeurs extrêmes de certains paramètres physico-chimiques, constituent les références ultimes concernant les limites physico-chimiques de la vie. Leurs formes de survie sont encore inconnues. Enfin, il est recommandé de valider ces nouvelles techniques sur des échantillons terrestres possédant les mêmes contraintes (faible abondance, risque de contaminations) que les échantillons extraterrestres tels que les glaces du lac Vostok.

Produire de nouvelles connaissances

Nature des connaissances

L'utilisation des instruments décrits ci-dessus pour participer aux futures missions d'exploration (Mars, Europe, comètes) devrait conduire à une meilleure connaissance de ces objets, mais aussi de leurs implications exobiologiques.

L'étude de la chimie du milieu interstellaire par simulations expérimentale en laboratoire et en orbite basse est une approche essentielle pour l'interprétation des observations et le développement de modèles.

La connaissance de cette chimie est intrinsèquement importante, elle l'est aussi par son apport au domaine même de la chimie. En effet, il s'agit d'une chimie originale intervenant dans des conditions extrêmes dans lesquelles de nouveaux processus et de nouvelles structures moléculaires peuvent être mis en évidence. Il en est de même de la chimie organique intervenant dans l'environnement de Titan. C'est ainsi, par exemple, que les propriétés chimiques et physico-chimiques (spectrales en particulier) des polyynes et cyanopolyynes, qui intéressent la chimie de ces deux types d'environnement, ont donné lieu au cours des dernières années à des avancées très significatives, qui ont très largement enrichi le champ disciplinaire classique de la chimie.

Ces études, de façon encore plus générale, peuvent conduire à une meilleure connaissance de l'environnement primitif terrestre, en particulier

des conditions physico-chimiques qui y régnaient, et des processus prébiotiques qui ont pu s'y dérouler. Elles contribueront donc de façon importante à l'amélioration de notre connaissance des origines de la vie sur notre planète, une des grandes questions qui interpellent l'Homme depuis des millénaires. Elles permettront aussi d'étendre ou de généraliser le concept du vivant et, peut-être, d'entrevoir enfin, avec moins d'anthropocentrisme, la "logique du vivant". Bien évidemment, ces études contribuent aussi à apporter des éléments de réponse à cette autre grande question que se pose aussi l'humanité depuis des millénaires : sommes nous seuls dans l'Univers ? Le cas de Mars, qui apparaît, toujours et plus que jamais, comme l'environnement le plus approprié pour la recherche d'une vie extraterrestre, illustre clairement l'intérêt toujours marqué du grand public pour cette question.

L'étude astro/exobiologique de la planète rouge doit être l'une des priorités, avec une approche très largement pluridisciplinaire. En effet, la synergie entre les mesures géochimiques et géologiques de l'environnement des échantillons martiens collectés et leurs mesures isotopiques, moléculaires et chirales, liées aux observations à différentes échelles et la recherche de biosignatures morphologiques, est l'approche idéale pour identifier la présence d'une vie passée dans les échantillons (application en tout premier lieu à l'exploration de Mars).

Archivage

L'archivage et le traitement des données sont essentiels pour que ces données précieuses puissent garder toute leur utilité et fructifier. Il nécessite de nombreux moyens au sol, dont :

- > **un archivage sur le long terme.** Ceci est particulièrement crucial pour les missions de longue durée, comme Cassini-Huygens ou Rosetta ou les programmes à long terme basés sur un nombre important de missions complémentaires, comme devrait être un véritable programme martien ambitieux.
- > **un soutien aux expériences de laboratoire,** aux observations complémentaires au sol, et au développement de modèles permettant d'intégrer les données. Ces trois approches essentielles pour produire de nouvelles connaissances nécessitent des moyens dont l'attribution est souvent insuffisante, alors que leur niveau nécessaire est la

plupart du temps très inférieur à celui des moyens engagés pour la mission spatiale proprement dite.

Diffusion

> Dans la communauté scientifique et auprès des étudiants

La communauté scientifique s'intéressant à l'espace s'est largement étoffée en France au cours des dernières décennies. Il en est de même de la communauté exo/astrobiologique. La création du Groupe de recherche (GDR) "Exobio", appuyée par le Cnes et systématiquement soutenue depuis au niveau financier, a induit cet élargissement, tout en commençant à structurer cette communauté. La structuration au niveau européen, avec la création récente du réseau européen d'exo/astrobiologie y a aussi contribué. L'établissement au Cnes d'un groupe de travail spécifique devrait aussi largement contribuer à la structuration de la communauté nationale et au développement des activités dans ce grand domaine, dont la diversité et la multidisciplinarité font toute la difficulté mais aussi toute la richesse. Le Cnes pourrait participer à la diffusion des connaissances dans ce domaine par l'intermédiaire d'une base de données scientifiques exo/astrobiologiques, qui pourrait être liée, par exemple, à la base de données planétologiques en cours de développement.

Le Cnes a aussi un rôle clé à jouer dans le domaine de la diffusion des connaissances auprès des étudiants. Le GDR "Exobio" est en train de recenser les enseignements dont la mise en place est prévue dans le cadre du Laboratoire de météorologie dynamique (LMD) dans le domaine de l'exo/astrobiologie. Ces informations, quand elles seront disponibles, pourraient être utilisées par le Cnes pour alimenter son site web, dans lequel une page exo/astrobiologique pourrait fournir des informations sur les parcours et enseignements disponibles en France et en Europe, dans ce domaine.

> Auprès du grand public

Le champ des connaissances couvert par le grand domaine de l'exo/astrobiologie est sans nul doute l'un de ceux pour lesquels le grand public est déjà très sensibilisé et son intérêt très fort. C'est un de ces domaines qui peuvent d'ailleurs contribuer à rapprocher le grand public de la science.

La diffusion des connaissances, auprès du grand public, est donc un aspect essentiel, qui doit connaître un plus large développement. L'exemple de la Nasa, qui investit systématiquement une fraction notable (plusieurs %) du budget des missions spatiales dans le *public outreach*, est à prendre en considération.

L'investissement de l'Esa dans ce domaine est encore trop faible. Le Cnes, avec l'aide de la communauté française, a très certainement un rôle fort à jouer en Europe, un rôle d'incitation auprès de l'Esa, un rôle de diffusion au niveau national et dans les pays francophones.

Programmation des missions : priorités

Compte tenu des grandes questions prioritaires dans le domaine de l'exo/astrobiologie et des projets en cours ou prévus, les priorités qui se dégagent en terme de missions spatiales sont les suivantes :

Microsatellites et minisatellites

En ce qui concerne l'exo/astrobiologie, les micro et minisatellites sont précieux pour préparer et optimiser les missions plus ambitieuses vers les objets d'intérêt exobiologique du système solaire. Ils permettent également de comprendre les phénomènes subis par les météorites lors de l'entrée atmosphérique (expérience "Stone" sur les satellites Photon, par exemple).

Station spatiale internationale

Plusieurs programmes d'intérêt exobiologique sont en cours ou en projet utilisant la plateforme de l'ISS. Il s'agit essentiellement de programmes étudiant l'évolution d'échantillons d'intérêt exobiologique (molécules biologiques ou prébiotiques, analogues de laboratoire des aérosols de Titan, analogues cométaires, etc.). Ces programmes, dont Expose, ont eu le soutien de l'Esa et du Cnes, mais sont actuellement dans l'incertitude de la disponibilité de missions vers l'ISS.

De nouveaux projets ont aussi été envoyés en réponse au récent appel d'offres ILSRA pour l'utilisation de la Station spatiale internationale. C'est le cas du projet

Evolution, dont l'objectif principal est de mieux connaître et de caractériser l'évolution de molécules organiques concernant Titan et les comètes, et donc aussi en relation avec les missions Cassini-Huygens et Rosetta.

Vol en formation

Les vols en formation devraient permettre de tester les techniques d'interférométrie à grande distance comme celles qui sont au cœur du projet Darwin. Ils peuvent donc offrir un soutien important aux missions de type Darwin, incluant des mesures spectroscopiques.

Recommandations vis-à-vis de l'Esa

Mars et Europe sont les deux objets prioritaires du système solaire pour la recherche d'une vie extraterrestre (présente ou passée). Les futures missions vers Mars devront inclure dans leurs objectifs cette recherche. Une large communauté en France est prête à y participer, qu'il s'agisse d'une mission Esa, Nasa ou d'une mission conjointe. Un soutien du Cnes dans ce domaine est indispensable. Il en est de même en ce qui concerne l'exploration exobiologique d'Europe.

Il conviendrait toutefois que les directions de l'Esa concernées travaillent ensemble de façon harmonieuse, en apportant leurs compétences complémentaires dans un tel programme. Il nous semble important que les États-membres, en particulier leurs agences spatiales, fassent passer un message dans ce sens à la direction générale de l'Esa. Le Cnes a certainement un rôle clé à jouer dans ce domaine.

Il en va de même pour la valorisation publique (*public outreach*) de la recherche spatiale en Europe.

Propositions de phases 0/A, R&T et études amont

Il est indispensable de continuer à soutenir les projets de développements expérimentaux en réponse à des *Announcements of opportunity* (AO) spatiaux à venir. Ce soutien pourrait faire partie d'un programme préparatoire à propositions d'expériences spatiales.

Ceci concerne tout particulièrement les missions MSL-09 de la Nasa, et, si une contribution française à ce programme est encore possible, au moins au niveau scientifique Jimo.

La communauté exobiologique française s'est fortement impliquée avec le programme Mars Premier dans les développements de techniques d'analyse exobiologique en laboratoire. En parallèle, de nombreuses équipes françaises ont participé à la réflexion induite par l'Esa à la fin des années 90, et coordonnée par l'*Esa exobiology study team*. Plus récemment, elles ont répondu à l'appel à idées émis dans le cadre du programme Aurora et qui a conduit au groupe de travail Exomars. Des projets de développements expérimentaux pour l'analyse exobiologique *in situ* de Mars sont en cours dans plusieurs laboratoires français. Leur soutien par le Cnes est indispensable pour que les équipes françaises aient une chance forte d'être présentes dans le programme Aurora et Exomars ou dans un futur programme encore à préciser de l'Esa vers Mars. Le programme préparatoire à propositions d'expériences spatiales doit aussi inclure les études au sol sur des échantillons terrestres analogues à des échantillons d'environnements extraterrestres. Ceci comprend :

- > étude d'analogues martiens : désert d'Atacama, échantillons de fumeurs noirs, etc. ;
- > étude d'analogues en Europe : glaces d'Antarctique, lac Vostok, etc. ;
- > étude d'analogues cométaires : collecte de poussières, analogues de laboratoire produits par irradiation de glaces, etc. ;
- > étude d'analogues des aérosols de Titan : produits par simulation en laboratoire.

Enfin, il est aussi indispensable que les missions en cours bénéficient d'un soutien du Cnes au niveau des programmes sol, pour le développement de modèles et de programmes expérimentaux en laboratoire, qui sont des approches essentielles pour traiter les données des missions spatiales et en tirer toute la substantifique science. C'est une des conditions *sine qua non* pour que son retour scientifique soit optimisé et son coût soit justifié auprès de la communauté nationale.