

Bilan scientifique - II- ACTIVITES SCIENTIFIQUES

II.2. Pôle de Planétologie

1. Présentation générale	1
2. Planètes telluriques	1
3. Planètes géantes	3
4. Satellites des planètes géantes	4
5. Astéroïdes	7
6. Comètes	8
7. Objets transneptuniens	9
8. Origine du Système Solaire	11
Prospective en Planétologie	12

II.2. Pôle de Planétologie

1. Présentation Générale

La période 2004-2008 a vu les activités du pôle de planétologie du LESIA se resserrer autour de l'exploitation de données spatiales des missions Mars Express, Venus Express et Cassini-Huygens, sur lesquelles le LESIA a fourni une instrumentation. Cette période couvre également la phase de « commissioning » de la sonde Rosetta (lancée en mars 2004) pendant laquelle des observations ponctuelles de la Terre, Mars, la Lune, de comètes et des astéroïdes cibles de la mission ont été acquises avec les instruments VIRTIS (en partie construit au LESIA) et/ou MIRO et OSIRIS (participation co-I du LESIA). Ces missions, encore en opération et dans lesquelles de nombreux chercheurs du LESIA sont impliqués, ont fourni des résultats fondamentaux sur la dynamique, chimie et photochimie des atmosphères de Vénus, Mars, Titan et Saturne, et sur leur surface dans le cas de Titan et Vénus. Ces activités dans le domaine de l'espace sont renforcées par notre participation instrumentale aux missions Bepi Colombo (instrument VIHI sur Simbio-Sys) et ExoMars (MicrOmega), et notre implication en tant que PI dans deux des missions sélectionnées pour étude du programme Cosmic Vision de l'ESA : Marco Polo et TSSM (ex-Tandem).

En symbiose avec ce programme d'exploration spatiale, nos activités se sont également tournées vers l'étude des planètes et des petits corps du système solaire par des observations au sol ou depuis des télescopes spatiaux (Spitzer, Odin). Pour certaines thématiques, comme l'étude de la composition des objets transneptuniens, des astéroïdes et des comètes, il s'agit d'une approche incontournable pour appréhender ces populations d'objets dans leur ensemble. Les domaines explorés vont du visible à la radio. Fortement impliqués dans deux programmes clés sur le temps garanti et sur le temps ouvert de l'Observatoire Spatial Herschel, les chercheurs du pôle de planétologie du LESIA sont également engagés dans la prospective ALMA et SKA.

2. Planètes telluriques

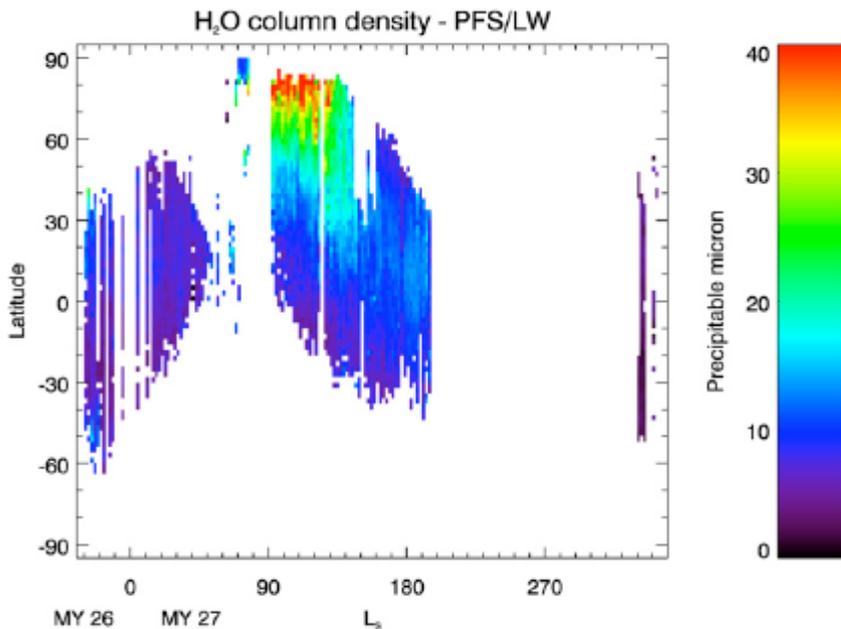
Les activités concernant les planètes telluriques et la Lune ont été dominées ces dernières années par l'exploitation des données des missions spatiales Mars Express, Venus Express et Smart-1. Sur ces missions, en orbite depuis janvier 2004, avril 2006, et entre novembre 2004 et août 2006 respectivement, le LESIA est très fortement impliqué par de nombreuses participations au niveau PI (VEx/VIRTIS) ou co-I (MEx/Omega, MEX/PFS, Smart-1/AMIE). Ces recherches ont été soutenues par la poursuite des observations depuis la Terre, parfois dans le cadre d'une campagne d'observations coordonnées avec les observations depuis l'espace.

Sur Mars, dans la continuation des travaux des années précédentes, de nombreux résultats ont été obtenus, les plus marquants étant :

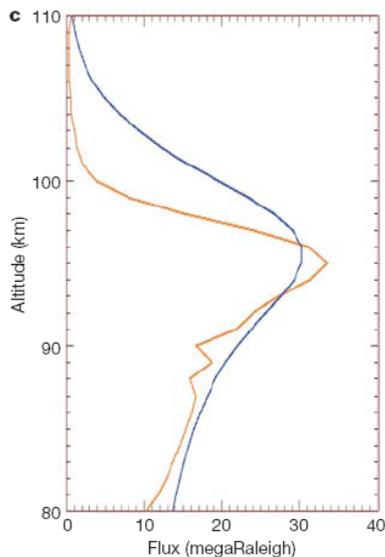
- L'étude du cycle de l'eau sur Mars, à partir des instruments PFS (Fouchet et al. 2007) et Omega (Encrenaz et al. 2005, Melchiorri et al. 2007, Maltagliati et al. 2008). Cette étude fait apparaître non seulement que le cycle de l'eau est plus sec qu'admis précédemment, mais aussi que la distribution verticale de l'eau est plus complexe que l'on ne l'imaginait: les résultats indiquent en particulier l'existence d'un réservoir d'eau échangeable entre le régolithe et l'atmosphère, au niveau de quelques micron-précipitables.
- L'étude des variations du monoxyde de carbone dans l'atmosphère de Mars (Encrenaz et al. 2006) à partir des données Omega. Elle montre notamment une variabilité saisonnière

importante de CO dans le bassin d'Hellas, qui résulte d'une redistribution dynamique de ce composé chimiquement inerte et non-condensable.

- L'étude de la poussière martienne et de ses effets sur les champs de température à partir de l'analyse combinée des données PFS et Omega.
- La mesure et le suivi temporel des vitesses des vents dans l'atmosphère moyenne de Mars à partir de mesures millimétriques, à antenne unique ou interférométriques, qui indiquent une circulation intense à toute saison, rapidement variable, et souvent en contradiction avec les prévisions des modèles de circulation générale.



Carte de la vapeur d'eau obtenue avec MEx/PFS (Fouchet et al. 2007)



Profil vertical de l'émission nocturne de O₂ sur Vénus (Drossart et al. 2007)

L'arrivée de la sonde spatiale VEx a permis une « re-découverte » de l'atmosphère de Vénus, notamment au travers des résultats de l'instrument VIRTIS à PI LESIA (P. Drossart). Parmi les résultats les plus spectaculaires obtenus, on peut citer :

- La découverte d'une structure dipolaire au pôle Sud de Vénus, équivalente à celle connue au pôle Nord. Cette structure, au centre d'un vaste vortex qui tourne autour du pôle, semble être associée à de rapides mouvements descendants (Piccioni et al. 2007).
- L'étude des émissions fluorescentes dans la haute atmosphère de Vénus, notamment l'émission nocturne (« nightglow ») de O₂, qui montre une structure complexe, fournissant un diagnostic de la circulation dans la mésosphère de Vénus vers 90 km, difficile à sonder autrement (Drossart et al. 2007, Gérard et al. 2007).

- La mesure de l'abondance de plusieurs gaz en-dessous des nuages, et notamment l'existence de variations anti-corrélées en latitude de CO et OCS, confirmant et amplifiant des résultats obtenus au LESIA à partir d'observations depuis la Terre (Marcq et al. 2006).
- La découverte du radical hydroxyl OH dans l'atmosphère de Vénus (Piccioni et al. 2008) et sa localisation en altitude. Ce composé est vraisemblablement produit par le mécanisme $H + O_3 \rightarrow OH^* + O_2$ et sa détection fournit de nouvelles contraintes sur les modèles photochimiques de Vénus.

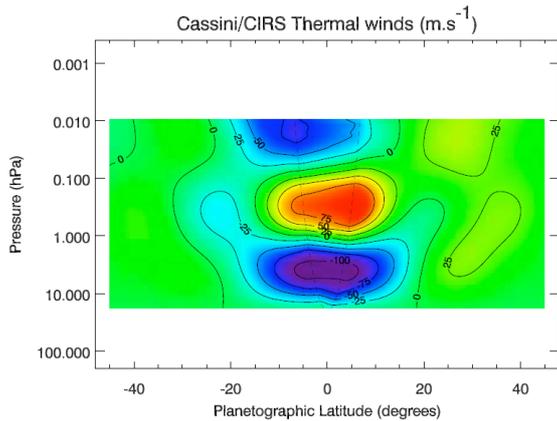
Concernant la Lune, suite au traitement scientifique des données obtenues par la micro-caméra AMIE (Advanced Moon micro-Imager Experiment), sur la mission Smart-1 de l'ESA, des cartes de relief ont été produites pour les régions polaires et pour d'autres régions d'intérêt, avec comme objectif la construction de mosaïques d'images AMIE pour l'ensemble de la surface de la Lune. Des éléments morphologiques de la surface lunaire ont été ainsi mis en évidence et utilisés pour préciser des analyses dérivées de Clementine grâce à une résolution spatiale plus élevée. L'activité effectuée sur les études de surface lunaire est complétée par la participation en tant que membre du NASA LPRP Lunar Geodesy and Cartography Working Group (LGCWG).

3. Planètes géantes

Les atmosphères des planètes géantes présentent une multitude de phénomènes remarquables à étudier. Du fait de leur masse et de leur volume, du spectre des sources chaleur aussi bien externes qu'internes, les atmosphères des planètes géantes constituent des laboratoires uniques pour la dynamique des fluides. Elles présentent également un couplage entre la photochimie et la dynamique particulièrement complexe. Enfin, elles fournissent quelques paramètres-clés pour contraindre les modèles de formation du système solaire. Leur étude constitue un enjeu essentiel pour la planétologie moderne, ainsi que pour l'étude plus générale de toutes les exoplanètes gazeuses.

Au cours des années 2004—2008, l'activité du LESIA s'est centrée principalement sur deux planètes, Saturne et Neptune, à travers des observations sol ou spatiales.

- **Neptune** : A partir d'observations des raies de CO dans le domaine millimétrique au télescope de 30 mètres de l'IRAM, Lellouch et al. (2005) ont montré que le profil vertical de CO n'était pas uniforme, mais présentait un maximum à haute altitude. Cette observation démontre qu'il existe une source externe de CO; ce gaz pourrait provenir de la chute d'une comète il y a environ deux siècles. Cette possibilité expliquerait également la présence, jusqu'à présent mystérieuse, de HCN dans l'atmosphère de Neptune. Une campagne d'observations sur l'instrument VISIR du VLT dans l'infrarouge thermique a permis d'obtenir des cartes de température de Neptune au niveau de la tropopause (Orton et al, 2007). Ces cartes révèlent un pôle sud très chaud, du fait de l'ensoleillement continu en cet été austral. Cette découverte permet d'expliquer la forte abondance stratosphérique du méthane, bien au-delà de la valeur limite imposée par la condensation à la température moyenne de la planète. Le méthane monte dans la stratosphère depuis l'anomalie thermique située au pôle sud, puis diffuse horizontalement au reste de la planète.



- **Saturne** : Le satellite Cassini est en orbite autour de Saturne depuis juillet 2004. A son bord, l'instrument CIRS (Composite Infrared Spectrometer) sonde la température et la composition chimique de l'atmosphère de Saturne entre 10 et 1400 cm^{-1} (7 μm et 1 mm). De plus, le champ de vue de l'instrument permet d'obtenir des visées au limbe de la planète, ce qui accroît la sensibilité aux faibles pressions et abondances ainsi que la résolution verticale. Ainsi, Fouchet et

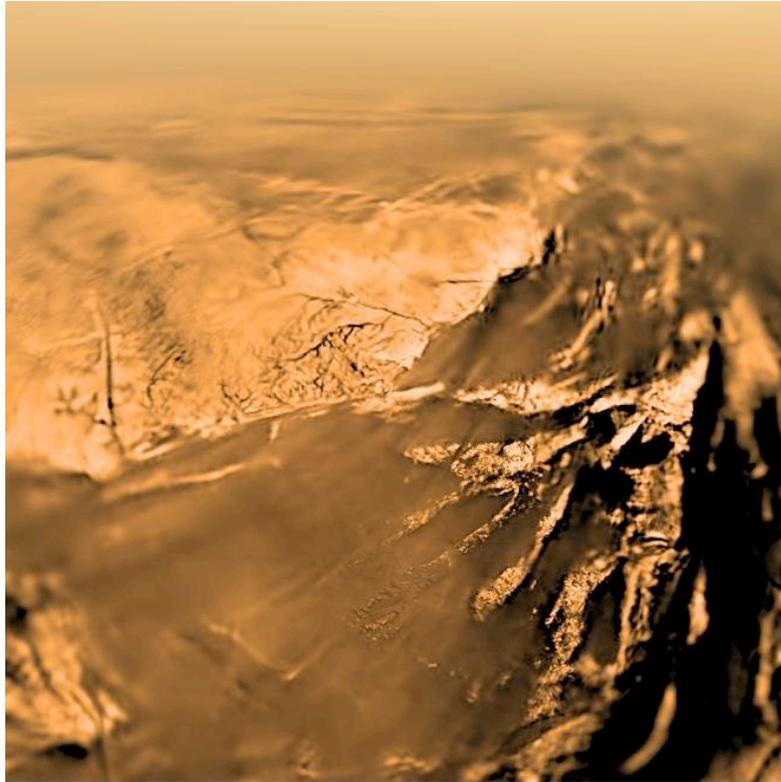
al. (2008) ont obtenu une carte inédite de la température dans la stratosphère de Saturne entre 20—0,003 hPa et 45°S—45°N. A partir de la température, il est possible de déterminer la direction et la vitesse des vents zonaux (est-ouest). La carte ainsi obtenue (Figure) montre l'existence de deux jets équatoriaux, de sens opposés, superposés. Cette structure est similaire à l'oscillation quasi-biennale terrestre et quasi-quadiennale jovienne. Elle est produite par l'interaction des ondes atmosphériques (ondes de gravité, ondes de Rossby, etc...) avec le vent zonal moyen. Les ondes, suivant leur type, transportent un moment angulaire direct ou indirect, qu'elles transfèrent préférentiellement au jet de même direction, propageant ainsi la structure vers le bas pour la faire osciller périodiquement. CIRS a également montré que Saturne est enrichie en carbone d'un facteur 7 (Flasar et al. 2005) par rapport au Soleil, une mesure essentielle pour contraindre la formation des planètes géantes.

4. Satellites des planètes géantes

La descente de la sonde Huygens dans l'atmosphère de Titan et son atterrissage réussi le 14 janvier 2005 ont constitué un grand moment de l'exploration spatiale. Les observations de l'instrument DISR, auquel le LESIA a directement participé, ont révélé un monde façonné par des processus géophysiques similaires à ceux qui se déroulent sur Terre mais avec des acteurs chimiques très différents. À partir des spectres visibles et infrarouges, on a déterminé que les aérosols photochimiques étaient des agrégats de plusieurs milliers de monomères ; leurs profils verticaux de densité et propriétés optiques ont été recouverts de 150 à 0 km. Le spectre de la surface montre une signature vers 1500 nm, probablement due à la glace d'eau, et une réflectivité qui décroît de 850 à 1500 nm, ce qui reste à interpréter. L'abondance du méthane dans les premiers 25 m de l'atmosphère a aussi été mesurée. Après une première analyse des données (Tomasko et al. 2005), des études plus approfondies ont paru en 2008. Le bilan radiatif de la stratosphère, et donc le forçage radiatif, a pu être calculé en combinant les données DISR et Cassini/CIRS (Tomasko et al. 2008a). Les coefficients d'absorption du méthane ont été déterminés de 830 à 1620 nm à partir des spectres enregistrés tout au long de la descente (Tomasko et al. 2008b) et seront très utiles pour modéliser les spectres Cassini/ VIMS par exemple. De nouvelles mesures de laboratoire à froid ont permis une détermination précise du rapport de mélange de CH_4 vers la surface ($5.1 \pm 0.8\%$) (Jacquemart et al. 2008).

L'instrument GCMS sur Huygens a détecté ^{40}Ar , produit de la désintégration du ^{40}K , ce qui indique un dégazage partiel du cœur rocheux de Titan (Niemann et al. 2005). La faible abondance des gaz rares primordiaux (seul ^{36}Ar est détecté à un niveau inférieur au ppm) a de fortes implications sur la

composition des planétésimaux qui ont été incorporés dans Titan et sur l'origine de l'azote atmosphérique. Le rapport isotopique $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ dans N_2 (0.67 fois la valeur terrestre) indique qu'une masse importante d'atmosphère s'est échappée au cours de l'évolution de Titan. Enfin, le profil vertical du méthane a été déterminé de 140 à 0 km.



Panorama de la surface de Titan enregistré par l'instrument DISR à bord de Huygens le 14 janvier 2005. On distingue sur un plateau clair, un réseau d'anciennes rivières qui se déversent dans une plaine plus sombre, constituée d'une suite de lacs asséchés. Copyright : ESA / NASA / Univ. Arizona

L'instrument HASI a mesuré *in situ* les profils de température et de densité de 1400 km jusqu'à la surface (Fulchignoni et al. 2005) et ces données ont permis de reconstruire la trajectoire de la sonde (Colombatti et al. 2008). La thermosphère présente plusieurs couches d'inversion, probablement d'origine dynamique. En dessous de 150 km, le profil de température est très proche de celui obtenu par l'expérience radio de Voyager et la température au sol est de 93.6 K. Les données indiquent une couche limite peu turbulente et un très faible flux de chaleur venant de la surface (Tokano et al. 2006a). Une analyse conjointe des données HASI et GCMS suggère la présence dans la troposphère d'un nuage de cristaux de méthane au-dessus d'un nuage de gouttelettes d'azote et de méthane qui produit un « crachin » atteignant la surface (Tokano et al. 2006b).

Depuis la mise en orbite de Cassini en 2004, l'instrument CIRS enregistre l'émission thermique de Titan à chaque survol du satellite. La structure thermique de la haute atmosphère a ainsi été cartographiée (Flasar et al. 2005). Dans la stratosphère, la température décroît fortement au-delà de 40°N, dans le vortex polaire, tandis que la stratopause et la mésosphère y sont plus chaudes. L'analyse des raies rotationnelles de CO et CH₄ a permis de mesurer l'abondance de ces deux molécules dans la basse stratosphère (Flasar et al. 2005, de Kok et al. 2007). La variation en latitude

de l'abondance de tous les nitriles et hydrocarbures détectés a été mesurée vers 120 km d'altitude à partir de séquences d'observations au nadir (Teanby et al. 2006, Coustenis et al. 2007). Le fort enrichissement observé pour les nitriles et certains hydrocarbures à haute latitude nord (hiver) est probablement dû à une circulation descendante et un confinement dans le vortex polaire. Des observations au limbe à plusieurs latitudes ont fourni les profils verticaux de ces gaz de 120 à 500 km environ (Vinatier et al. 2007a, Teanby et al. 2007). Aux latitudes moyennes, leurs rapports de mélange (sauf pour l'éthylène) croissent avec l'altitude du fait de leur production photochimique dans la haute atmosphère. Dans le vortex polaire, des minima locaux sont observés vers 300-400 km, ce qui traduit une dynamique complexe. De nombreux isotopes d'hydrocarbures et de nitriles ont été détectés, certains pour la première fois (Nixon et al. 2008, Vinatier et al. 2007b, Bézard et al. 2007). Une première détection de l'isotope C₂HD a permis de déterminer un rapport D/H dans l'acétylène qui suggère un fractionnement dans l'atmosphère de Titan (Coustenis et al., 2008a). Enfin, le rapport ¹⁴N/¹⁵N mesuré dans HCN (Vinatier et al. 2007b), trois fois plus faible que dans N₂, implique un processus de fractionnement dans la production photochimique de HCN.

L'instrument VIMS, qui couvre la gamme 0.35-5 µm, permet d'étudier le cycle météorologique du méthane et de l'éthane avec l'observation, à latitude moyenne, de nuages convectifs de méthane qui évoluent et se dissipent en quelques heures (Griffith et al. 2005) et, au-delà de 50°N, d'un vaste nuage d'éthane dans la troposphère (Griffith et al. 2006). La détection d'émission thermique de CO à 5 µm a permis une mesure de son abondance stratosphérique (Baines et al. 2006). Une occultation solaire dans l'hémisphère sud a fourni le profil vertical d'extinction des aérosols de 1 à 5 µm, avec notamment une absorption à 3,4 µm due à des composés organiques complexes. Des résultats marquants ont aussi été obtenus sur la surface de Titan et des autres satellites de Saturne :

- Détection possible d'un cryo-volcan à la surface de Titan (Sotin et al. 2005)
- Détection d'une région anormalement brillante à 5 µm sur Titan qui pourrait être associée à un événement géophysique récent (Barnes et al. 2005)
- Mise en évidence de glace d'eau amorphe et cristalline, de glace de CO₂ et de composés organiques au pôle sud d'Encelade
- Détection de glace de CO₂ sur le matériau sombre de Japet
- Détection de PAHs sur Phoebé et sur une région sombre de Japet

En accompagnement de la mission Cassini/Huygens, des observations en optique adaptative depuis le sol au VLT ont permis de caractériser les asymétries nord-sud et est-ouest de la brume atmosphérique (Hirtzig et al. 2006, 2007), de caractériser l'albédo de la surface dans la fenêtre à 2 µm (Negrão et al. 2007) et de déterminer une limite supérieure à l'abondance de la glace de CO₂ (Hartung et al. 2006). Une analyse du spectre de Titan enregistré par le satellite ISO vers 3 microns suggère une limite supérieure de 3% à l'abondance du méthane en moyenne sur le disque et contraint l'albédo de la surface à ces longueurs d'onde (Coustenis et al. 2006). L'analyse d'occultations stellaires de Titan en 2003 a révélé une couche d'inversion marquée vers 515 km et a apporté des contraintes sur le régime des vents vers 250 km et sur la distribution de la brume à cette altitude (Sicardy et al. 2006). Dans le domaine millimétrique, des observations avec l'interféromètre du Plateau de Bure en 2003, 2004 et 2005 ont fourni des cartographies partielles de Titan dans les raies de CO, HC₃N et CH₃CN avec une résolution spatiale de 0,6". Les variations en latitude de concentration semblent différentes pour HC₃N et CH₃CN. La très haute résolution spectrale des mesures a aussi permis de déterminer la vitesse et le sens des vents zonaux vers 300 et 450 km (160 et 60 m/s respectivement), à plus haute altitude que les mesures *in situ* de Huygens (Moreno et al. 2005, Moreno et Marten 2008).

L'étude de l'atmosphère de Io par spectroscopie millimétrique s'est poursuivie. Les premières observations résolvant le disque de Io à 1,4 mm ont été obtenues en 2005 avec l'interféromètre du

Plateau de Bure (Moulet et al. 2008). Elles indiquent que l'atmosphère de SO₂ est plus étendue que ce qui avait été déduit à partir d'observations à antenne unique, couvrant 60-80 % de la surface. En combinant ces observations avec des données antérieures au 30-m de l'IRAM, la température du gaz a été estimée à 130-180 K. Enfin, l'étude des cartes d'émission de SO₂ suggère l'existence de vents rapides de l'ordre de 300 m/s selon une direction prograde, un comportement surprenant dont l'origine reste à comprendre.

Enfin, l'analyse des données d'une occultation stellaire par Titania, le plus gros satellite d'Uranus, nous a permis de contraindre le rayon à 788.4 ± 0.6 km, la densité à 1.711 ± 0.005 g cm⁻³, de mesurer l'écart dynamique aux éphémérides DE405 + GUST86 à une précision de l'ordre de 10 mas, enfin de déterminer une limite supérieure pour l'existence d'une atmosphère N₂, CO₂ ou CH₄ de l'ordre de 10 nbar. Ces recherches ont permis de développer des outils de diagnostic pour l'analyse de futures données d'occultation d'objets transneptuniens attendues dans les prochaines années, et des contraintes sur les propriétés de sublimation des volatiles de surface (Widemann et al. 2008).

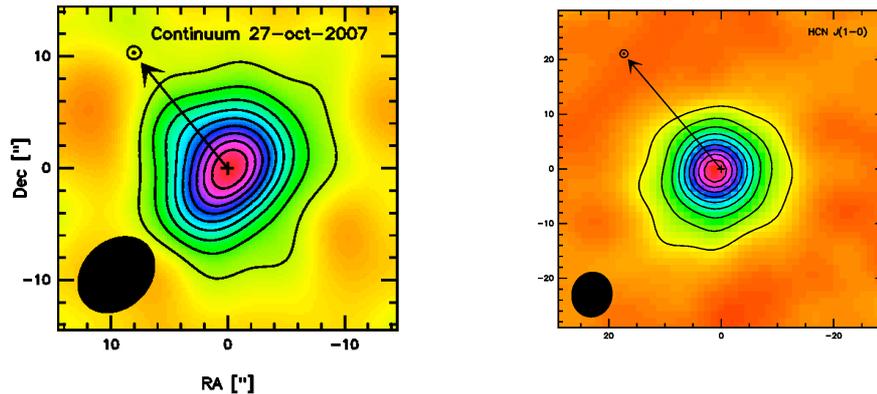
5. Astéroïdes

Les planétologues du LESIA ont une activité importante sur plusieurs thématiques concernant les astéroïdes. Beaucoup de temps d'observation sur les plus grands télescopes au sol et en orbite terrestre leur est accordé chaque année. En 2004-2008, les principaux travaux de recherche ont porté sur:

- L'étude de la surface de Troyens de Jupiter, afin de caractériser la composition de surface des objets inférieurs à 50 km de diamètre et comprendre leur origine et leur relation avec les autres petits corps du système solaire externe. En effet, les Troyens se situent dans la région de transition entre les corps rocheux et ceux constitués principalement de glaces. Nous disposons déjà d'un échantillon de 80 Troyens observés en spectroscopie visible.
- L'exploitation et l'interprétation par des modèles thermiques de données obtenues avec le télescope spatial SPITZER sur Lutetia et Steins, les cibles de Rosetta, et sur une dizaine de géocroiseurs en soutien à la mission Marco Polo proposée par notre équipe pour Cosmic Vision (ESA). Ces données ont permis de mesurer la taille et l'albédo de ces objets ainsi que de fournir des contraintes sur leur composition. Les observations au sol (visible, infrarouge proche) des astéroïdes cibles des missions spatiales Rosetta et Dawn ont permis d'améliorer la connaissance des propriétés physiques des cibles et sont importantes pour la programmation des observations pendant leur survol par Rosetta et Dawn.
- La spectroscopie d'astéroïdes rares de type E.
- L'observation de jeunes familles d'astéroïdes, afin de comprendre leur évolution dynamique et collisionnelle. L'étude de ces familles offre une opportunité unique d'investiguer : a) le résultat d'une collision relativement peu affectée par des phénomènes tels que l'érosion collisionnelle et la diffusion dynamique des fragments (résonance, effet Yarkovsky) qui altèrent au cours du temps leurs propriétés ; b) la structure interne et la composition du corps parent; c) l'effet de l'altération spatiale pour des temps d'exposition très courts.
- Des simulations de laboratoire pour analyser les effets du bombardement ionique de cibles de minéraux et de météorites afin d'étudier les effets d'altération de surface (*space weathering*).

6. Comètes

Les observations des molécules des comètes permettent d'aborder les problèmes de l'origine de ces corps, de la composition de leurs noyaux, des phénomènes de sublimation de leurs glaces, de la formation et du développement de leurs atmosphères. Le LESIA est particulièrement impliqué dans les observations spectroscopiques de ces molécules en radio et dans l'infrarouge. Il a une expertise de longue date dans la modélisation des processus physico-chimiques dans les atmosphères cométaires et vient de mettre un pied dans la machinerie de l'évolution thermique des noyaux cométaires et de la sublimation de leurs glaces.



Observations vers 3 mm de longueur d'onde de la comète 17P/Holmes juste après son sursaut avec l'interféromètre de l'IRAM au Plateau de Bure. À gauche, cartes du continuum de la poussière. À droite, carte de la raie J(1-0) de HCN. (D'après Figs 1 et 2 de Boissier et al. 2008, ACM.)

Le taux de production d'eau des comètes est systématiquement observé à partir des raies du radical OH avec le radiotélescope de Nançay (21 comètes en 2004-2008). La forme de ces raies a aussi permis une étude cinématique (Tseng et al. 2007). L'eau a également été directement observée par sa raie submillimétrique à 557 GHz avec le satellite Odin dans 13 comètes en 2001-2006 (Biver et al. 2007a) et son émission a été modélisée par un modèle rigoureux de transfert de rayonnement utilisant la méthode de Monte Carlo (Zakharov et al. 2007).

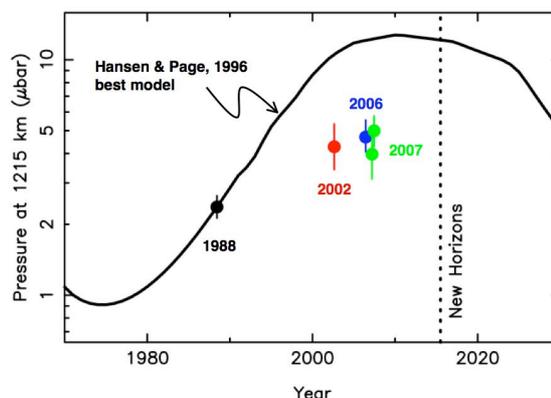
L'analyse des observations de la comète Hale-Bopp avec l'interféromètre de l'IRAM acquises en 1997 s'est poursuivie. L'étude des cartes d'émission millimétrique des molécules soufrées H₂S, SO et CS a permis de contraindre la durée de vie photodissociative de ces molécules et de mettre en évidence des inhomogénéités de production à la surface du noyau de cette comète (Boissier et al. 2007). Afin d'expliquer le jet de CO en rotation avec le noyau mis en évidence sur les cartes interférométriques à 230 GHz, des simulations hydrodynamiques de la coma ont été effectuées en collaboration avec J.-F. Crifo qui établissent que ce jet est dû à une importante surproduction locale de ce gaz et non à une structure de choc créée par la topographie de surface (Boissier et al. 2008).

La composition chimique et isotopique des comètes a été étudiée par spectroscopie radio à IRAM, au Caltech Submillimeter Observatory à Hawaï et avec le nouvel instrument APEX au Chili. Ces observations sont harmonieusement complétées par des observations infrarouges faites à l'IRTF et au télescope Keck à Hawaï, ainsi qu'avec le télescope spatial Spitzer. Ces campagnes d'observation multi-instruments (Biver et al. 2006) se sont concentrées ces dernières années sur C/2002 T7 (LINEAR), C/2001 Q4 (NEAT), C/2004 Q2 (Machholz) et surtout sur :

- **9P/Tempel 1** en 2005, en support de la mission Deep Impact. Suite à l'impact, aucune augmentation importante du taux global de production de gaz de la comète n'a été mesurée. Sa composition a été trouvée normale. Des changements de la forme des raies moléculaires et une surabondance du méthanol ont cependant été observés juste après l'impact (Biver et al. 2007b).
- Les fragments principaux de **73P/Schwassmann-Wachmann 3** lors de leur approche de la Terre (à seulement 0,08 UA) au printemps 2006. Une composition chimique remarquablement similaire a été observée en spectroscopie radio et infrarouge pour les deux fragments B et C, suggérant que le noyau initial était homogène (Dello Russo et al. 2007). Cependant, cette comète a une composition particulière; elle est très pauvre en méthanol et le rapport HNC/HCN est très bas (Lis et al. 2008).
- **C/2006 P1 (McNaught)**. Cette comète est devenue très brillante — visible en plein jour — lors de son passage à 0,17 UA du Soleil en janvier 2007. Des observations ont alors été faites sur alerte à Nançay et à l'IRAM pour étudier les conditions physiques particulières régnant dans une atmosphère cométaire si près du Soleil.
- **17P/Holmes**. Cette comète télescopique à courte période a montré un sursaut exceptionnel en octobre 2007, son éclat augmentant brutalement de 13 magnitudes. Des observations ont aussitôt été organisées au Pic-du-Midi, à Nançay et à l'IRAM (Figure). Son évolution a pu être suivie et sa composition étudiée. Le rapport isotopique $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ a été mesuré à la fois dans la molécule HCN à l'IRAM et dans le radical CN en optique à l'ESO. Le même enrichissement en ^{15}N , d'un facteur 2 par rapport à la valeur terrestre, a été observé (Bockelée-Morvan et al. 2008). Ce qui remet en cause des observations similaires faites dans la comète Hale-Bopp, qui suggéraient alors une source de CN autre que HCN.
- **8P/Tuttle**. Cette comète a fait l'objet d'une importante campagne d'observations multi-longueurs d'ondes lors de son passage à 0,25 UA de la Terre début janvier 2008 : en radio, à Nançay, l'IRAM (30-m et interféromètre) et au CSO; en infrarouge, les premières observations cométaires avec l'instrument VLT/CRILES; dans le visible, FORS1 et UVES au VLT. Ces observations acquises pour la plupart simultanément sont en cours d'analyse.

7. Objets transneptuniens

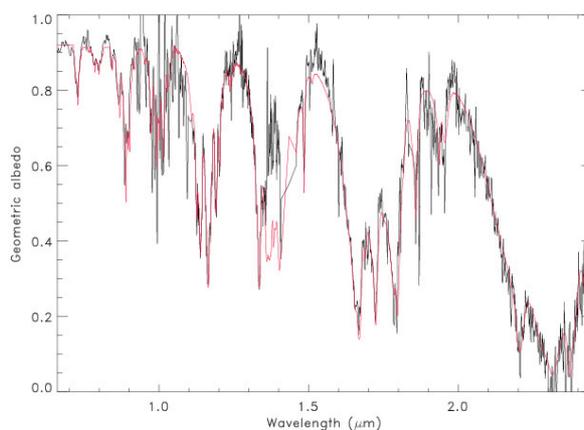
Les Objets transneptuniens (TNO, ou Objets de Kuiper) sont des petits corps en orbite autour du Soleil au-delà de Neptune. Pluton, aussi classifié planète naine, est l'un d'entre eux, et il est de loin le plus brillant à cause de sa taille et de son albédo élevé



Suivi de l'atmosphère de Pluton en 2006 et 2007 qui montre une expansion d'un facteur deux entre 1988 et 2002, puis une stabilisation (Sicardy et al. 2007). Cette évolution est en accord qualitatif (mais non quantitatif) avec le modèle théorique de Hansen et Paige (Icarus 120, 247–265, 1996

Plusieurs études ont été menées au LESIA sur Pluton et Charon, son satellite principal. Cinq occultations stellaires par Pluton observées en 2005 et 2006 ont permis de confirmer la spectaculaire expansion (d'un facteur deux en pression) de l'atmosphère de la planète depuis 1988. Une analyse en cours montre que cette expansion s'est stabilisée depuis 2002 (Sicardy et al. 2007). Ces observations permettent de tester les modèles théoriques qui décrivent les interactions complexes entre insolation solaire, distance héliocentrique, inertie thermique et taches d'albédo, et explique in fine la pression de cette atmosphère à la surface de Pluton. Par ailleurs, en juillet 2005, une occultation par Charon observée au Chili (VLT/Paranal et San Pedro de Atacama) et en Argentine a permis de déterminer avec une précision kilométrique le rayon du satellite, $R_C = 604 \pm 1.4$ km (Sicardy et al. 2006a). Cette valeur a permis de déduire avec une précision inégalée la densité de Charon (1.63 ± 0.06 g cm⁻³). Enfin, des observations au VLT ont permis la première détection au sol du satellite Hydra (Sicardy et al. 2006b).

Bien que le premier objet transneptunien autre que Pluton n'ait été découvert qu'en 1992, plus d'un millier de ces objets ont été détectés à ce jour. Ce sont probablement les corps les plus primitifs du système solaire car ils contiennent le matériau thermiquement le moins perturbé. Leur étude peut donc fournir de précieux indices sur la formation du système solaire. Le LESIA a contribué de façon importante ces dernières années à l'étude des propriétés de surface de ces objets peu lumineux grâce, en particulier, à l'obtention d'un grand nombre de nuits (510 heures d'observation) au VLT (Chili) de l'ESO dans le cadre d'un nouveau « Large Programme » (P.I. : M.A. Barucci) couvrant la période d'oct. 2006 à fin 2008 qui fait suite à un « Large Programme » (années 2001-2003) dont H. Boehnhardt était le P.I.. Ce nouveau programme inclut l'étude des Centaures, qui sont probablement des objets transneptuniens qui ont été éjectés vers l'intérieur du système solaire.



Spectre du TNO Eris (aussi catalogué planète naine) observé avec le VLT (instruments FORS, ISAAC et SINFONI) en 2006. On distingue de très nombreuses absorptions dues à la glace de méthane. Le modèle (trait rouge) représenté sur la figure correspond à un mélange de 82 % de méthane pur et 18% de méthane dilué dans l'azote (Merlin et al. 2008, AJ, soumis)

Les recherches sur les objets transneptuniens autres que Pluton ont comporté plusieurs volets : études photométriques (visible et IR) d'un nombre important d'objets (au VLT, ainsi qu'au CFHT à Hawaï; Delsanti et al. 2006 ; Doressoundiram et al. 2005a, 2007), études spectroscopiques (visible et IR) d'un nombre plus restreint d'objets (au VLT uniquement; de Bergh et al. 2005 ; Doressoundiram et al. 2005b ; Dumas et al. 2007 ; Barucci et al. 2005a, 2006, 2008 ; Merlin et al. 2005, 2007 ; Alvarez et al. 2007), la spectroscopie nécessitant de très nombreuses heures d'observation, surtout dans l'infrarouge, et quelques études de polarimétrie (également au VLT ; Belskaya et al. 2008). Les points les plus marquants sont les suivants:

- La grande variété de couleurs de ces objets, du neutre au très rouge, mise en évidence dans le visible est également observée dans l'IR. Les tendances qui ont pu être dégagées, liées à la distance au soleil, aux résonances, etc., à partir des données dans le visible sont beaucoup moins nettes dans l'infrarouge. Une première taxonomie des objets a pu être effectuée (Barucci et al. 2005b ; Fulchignoni et al. 2008) sur la base des mesures de photométrie à différentes longueurs d'onde (bandes du visible B,V,R et bandes de l'infrarouge I,J,H,K) qui sera à affiner lorsque le nouveau « Large Programme » de l'ESO sera achevé.
- La spectroscopie des objets a permis de mettre en évidence dans l'infrarouge proche des signatures de la glace d'eau cristalline (pour plusieurs objets), du méthanol solide (pour deux objets), du méthane solide (pour quatre objets). De plus, une absorption observée dans un spectre IR d'Orcus est attribuée à de l'ammoniac hydraté, des signatures détectées dans le visible pour plusieurs objets pourraient être dues à des silicates hydratés, et de l'azote solide pourrait être présent sur Sedna et Eris. Un certain nombre d'objets ne montrent aucune signature spectrale particulière, probablement à cause de l'existence d'une croûte superficielle qui masquerait les glaces sous la surface.

La modélisation des spectres a été entreprise. Les composés introduits dans les modèles pour expliquer la couleur rouge des objets sont, pour le moment, des tholins ou des matériaux de type kérogène. Il faut remarquer ici est qu'on trouve parmi les objets transneptuniens les objets les plus rouges du système solaire. Les objets transneptuniens sont donc recouverts d'un matériau rare. Les autres composés introduits dans les modèles, en plus des glaces et des silicates hydratés, sont du carbone amorphe (pour rendre compte du faible pouvoir réfléchissant des surfaces) et des silicates anhydres.

Par ailleurs une recherche d'objets très petits est menée par la recherche d'occultations aléatoires d'étoiles observées en photométrie rapide. Les objets détectés n'étant pas re-observables, il s'agit d'une méthode statistique (c'est à dire qu'il faut analyser un grand nombre d'évènements pour avoir des résultats) d'évaluation de la population des très petits objets transneptuniens afin d'en apprendre davantage sur l'histoire collisionnelle de cette zone du système solaire. Cette méthode permet aussi de sonder la partie extérieure du système solaire jusqu'au nuage de Oort puisqu'elle est sensible à des objets de quelques kilomètres de diamètre situés à des milliers d'unités astronomiques. Les premières détections ont été obtenues récemment par plusieurs équipes, dont celle de F. Roques au LESIA (Roques et al. 2006, 2008)

Un livre de l' « University of Arizona Press » intitulé « The Solar System Beyond Neptune » est paru en 2008. Sept chercheurs du LESIA ont participé de façon très importante à la rédaction de ce livre dont A. Barucci était l'éditeur principal.

8. Origine du Système Solaire

L'implication du LESIA dans la mission spatiale Cassini-Huygens a permis d'obtenir des résultats fondamentaux sur les conditions dans lesquelles s'est formé le Système Solaire. A partir du spectromètre infrarouge CIRS à bord de la sonde Cassini, Fouchet et al. (2004) ont déterminé le rapport $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ en fonction de la latitude sur Jupiter. Ils ont confirmé que la valeur de ce rapport impliquait bien que l'essentiel de l'azote dans Jupiter provenait bien de N_2 sous forme moléculaire. L'analyse de Hersant et al. (2008), qui utilise la mesure de C/H dans Saturne mesurée à partir de CIRS, et les mesures de N/H et S/H à partir du sol, suggère que le cas de Saturne serait différent. C'est aussi ce que semble indiquer la déficience en N_2 observée dans plusieurs comètes provenant

du nuage de Oort. Iro et al. (2003) ont argumenté que N_2 n'avait pu être piégé dans la glace cristalline au moment de la formation de ces comètes. Gautier et al. (2006) ont présenté une analyse préliminaire du rapport H_2/He dans Saturne, information indispensable à la modélisation des modèles de l'intérieur de la planète. Ce rapport est encore imprécis, mais se rapproche de l'analyse révisée des données de IRIS sur Voyager.

La composition de Titan a été mesurée in situ par l'instrument GCMS (Gas Chromatograph and Mass Spectrometer) à bord de la sonde atmosphérique Huygens (Niemann et al. 2005). Ces auteurs ont mesuré dans Titan le rapport $^{14}N/^{15}N$ dans N_2 , constituant majeur de l'atmosphère du satellite. Ce rapport est différent de la valeur tellurique, ce qui est interprété comme indiquant une substantielle perte de masse de l'azote de Titan depuis la formation de l'atmosphère. Une importante découverte effectuée par le GCMS est la détection de l'isotope 36 de l'argon, qui est primordial. Elle implique que cet argon fut piégé dans les planétésimaux qui formèrent Titan, puis s'est ultérieurement échappé dans l'atmosphère. Cet échappement est en accord avec la détection de l'isotope 40 qui provient de la désintégration radioactive du potassium 40 contenu dans les silicates qui constituent le noyau de Titan. La non détection du krypton et du xénon peut s'interpréter par le fait que ces gaz sont piégés au fond de l'océan d'eau sub-surfacique du satellite (Tobie et al. 2008, en préparation).

Le spectromètre CIRS a mesuré le rapport D/H dans le méthane de l'atmosphère de Titan (Bézar et al. 2007, Coustenis et al. 2007). Ce rapport est enrichi par un facteur d'environ 6 par rapport à la valeur protosolaire, mesurée dans Jupiter et Saturne par la sonde Galileo et par l'observatoire infrarouge spatial ISO.

Les planétologues du LESIA effectuent de manière persistante des mesures de composition cométaire. Cette composition est très variable d'une comète à l'autre et suggère que cette population de petits corps inclut des objets formés dans des régions très différentes de la nébuleuse primitive, de composition inhomogène. Une découverte surprenante est la mesure du rapport $HC^{14}N/HC^{15}N$ dans la comète périodique 17P/Holmes (Bockelée-Morvan et al. 2008) qui a été trouvé très inférieur au rapport terrestre et au rapport Jovien. Ceci suggère la présence de réservoirs isotopiques très différents dans la nébuleuse solaire.

Prospective en Planétologie

Concernant les planètes telluriques, pour les années à venir, les activités vont se concentrer sur la fin de l'analyse des données **Mars Express** et **Venus Express**, et la préparation des missions spatiales futures, notamment la mission **ExoMars** de l'ESA qui doit être lancée en 2013. Le LESIA est en effet impliqué dans l'expérience MicrOmega (responsable : J.-P. Bibring, IAS) qui sera embarquée sur ExoMars, mission qui déploiera un rover avec un ensemble d'instruments dédiés à la recherche de vie passée ou présente, la caractérisation de l'environnement géochimique et en eau de la sub-surface, et l'étude des conditions à la surface en termes d'habitabilité. L'instrument MicrOmega est un microscope imageur hyper-spectral qui analysera des échantillons du sol martien pour en caractériser la structure, la morphologie et la composition à l'échelle des grains. Le LESIA fournira l'électronique du module infrarouge de l'instrument et caractérisera le détecteur avant livraison. Après le début des opérations à la surface de Mars en 2014, le LESIA participera au

traitement et à l'analyse scientifique des données. Parallèlement à ces préparatifs, un second volet sera la poursuite des observations au sol par spectroscopie infrarouge et millimétrique de Vénus et Mars, avec en ligne de mire la préparation à ALMA.

La continuation de la mission **Cassini** en mission étendue jusqu'en 2010, puis possiblement jusqu'en 2016 (date du solstice d'été dans l'hémisphère nord de Saturne) demandera un investissement important au cours de la période 2008-2012 car les instruments où le LESIA est impliqué (CIRS, VIMS) vont bien sûr continuer à fournir une masse de données à analyser. Surveiller les changements saisonniers, aussi bien de la température que de la photochimie, observer l'inversion de phase de l'oscillation équatoriale, constitueront nos principaux objectifs scientifiques concernant Saturne. Sur Titan, l'objectif est de compléter la cartographie 3D des espèces photochimiques et des aérosols, de caractériser les variations saisonnières et de rechercher des molécules non encore détectées.

Toujours au niveau spatial, le LESIA est impliqué dans la construction du spectro-imageur VIHI (caractérisation des détecteurs et électronique de proximité) sur l'instrument Simbio-Sys de la mission **BepiColombo** vers Mercure dont le lancement est prévu en 2013. Un programme d'observations systématiques de Mercure dédié à l'étude de sa surface et de son exosphère a débuté en 2007 en collaboration avec le Service d'Aéronomie.

L'année 2009 sera l'année du lancement du satellite **Herschel**, opérant dans les domaines submillimétrique et infrarouge lointain. Plusieurs planétologues du LESIA sont co-investigateurs du programme-clé à temps garanti « Water and related chemistry in the Solar System » qui regroupe plusieurs objectifs scientifiques : mesurer précisément le rapport D/H, mesurer l'abondance de l'eau dans la stratosphère des planètes géantes et son profil vertical sur Jupiter et Saturne, afin de mieux contraindre les sources des flux externes d'oxygène dans les planètes géantes. Herschel effectuera également un relevé complet du spectre des planètes géantes afin de détecter les transitions de NH₃, PH₃ et CH₄ sur Jupiter et Saturne, de HCN et CO sur Neptune. Sur Titan, des raies de la vapeur d'eau (molécule initialement détectée avec le satellite ISO) seront observées : le profil vertical de ce corps pourra être déterminé et des variations temporelles seront recherchées. L'objectif est de contraindre l'origine externe de l'eau présente dans la très haute atmosphère (impacts cométaires, IDPs, anneaux ou satellites glacés) de Titan. Pour les comètes, l'accent est porté sur la mesure du rapport D/H dans l'eau (la première mesure dans une comète de la famille de Jupiter devrait être obtenue), l'étude de ses conditions d'excitation, et l'identification de nouveaux composés par des spectres complets avec les instruments PACS et SPIRE. Nous sommes également fortement impliqués dans un programme clé sur le temps ouvert (essentiellement avec l'instrument PACS) qui a pour objectif principal de mesurer la taille, l'albedo d'une centaine d'objets transneptuniens et, pour les plus brillants d'entre eux, de caractériser leurs propriétés thermophysiques.

La période 2008—2012 verra également la mise en service d'**ALMA**. Les chercheurs du LESIA sont actifs dans la préparation des observations. La cartographie de CO et de HCN sur Neptune, la mesure de la vitesse des vents par effet Doppler seront nos principaux projets scientifiques sur les planètes géantes. En parallèle, nous continuerons de suivre l'évolution de la température et de la photochimie sur Neptune par des observations dans l'infrarouge thermique. En prévision d'ALMA, des observations de Io au SMA (SubMillimeter Array) ont été effectuées en 2006 et d'autres sont prévues en 2008-2009. Leur analyse permettra de déterminer la distribution spatiale de SO et SO₂ à la surface du satellite. Les observations ALMA des comètes porteront en priorité sur l'étude de la composition chimique et isotopique de la phase volatile des comètes de la famille de Jupiter, encore peu étudiées. Nous participons au travail de prospective SKA sur des projets cométaires. Le

programme Herschel de caractérisation de la taille et de l'albedo des objets transneptuniens sera poursuivi avec ALMA.

Deux projets de photomètres multi-objets à fibres sont en cours d'étude, l'un à l'OHP (projet **MEFOS**), l'autre sur un VLT de l'ESO (projet **ULTRAPHOT**). L'un des objectifs de ces instruments est d'évaluer la population des très petits objets transneptuniens (et au-delà, jusqu'au nuage de Oort) par recherche d'occultations stellaires en photométrie rapide.

L'activité principale des prochaines années dans le domaine des astéroïdes sera consacrée à l'analyse et à l'interprétation des données recueillies au moment des survols de Steins (5 septembre 2008) et de Lutetia (10 juillet 2010) par la sonde spatiale **Rosetta**. Nous continuerons aussi à participer aux campagnes d'observation des objets cibles des missions Dawn (Cérès et Vesta) et Marco Polo (pour caractériser les candidats potentiels et optimiser le choix final). Nous aurons une activité importante de modélisation cométaire pour préparer Rosetta (le LESIA est fortement impliqué dans les instruments infrarouge VIRTIS et radio MIRO).

Spectroscopie visible/IR de TNOs: du temps d'observation sera demandé au VLT pour obtenir de meilleures observations pour certains objets particulièrement intéressants, et pour observer des objets nouvellement découverts. Par ailleurs, nous continuerons à affiner nos modèles de transfert radiatif et nous renforcerons nos collaborations avec les équipes qui sont à même d'effectuer les simulations de laboratoire les mieux adaptées à nos besoins (LPG de Grenoble, Catane).

En dernier lieu, un point fort de notre activité de prospective est lié au programme **Cosmic Vision** de l'ESA. Dans la thématique de la planétologie, deux missions à PI LESIA ont été sélectionnées pour étude de faisabilité : les missions **Marco Polo** (PI A. Barucci) et **Titan / Saturn System Mission** (TSSM, ex-TandEM, PI A. Coustenis). Le LESIA a également une forte contribution scientifique dans la mission **Europa Jupiter System Mission** (EJSM, ex-Laplace, PI M. Blanc), également sélectionnée en partenariat avec la NASA et la JAXA. Pour ces trois missions, le LESIA est fortement impliqué sur le plan de l'instrumentation, et propose notamment la fourniture de spectro-imageurs dans le domaine visible et infrarouge proche.

Marco Polo (de classe M) est une mission de retour d'échantillons d'un astéroïde géocroiseur primitif (NEO), proposée en collaboration avec l'agence japonaise JAXA, qui contribuera à une meilleure compréhension de l'origine et de l'évolution du système solaire, de la Terre, et de la vie (cf <http://www.lesia.obspm.fr/cosmicvision/neosr/>). Les petits corps du système solaire, résidus du système solaire primitif, fournissent des indices sur le mélange chimique à partir duquel les planètes se sont formées il y a 4.6 milliards d'années. Certains scénarios proposés pour expliquer l'origine de la vie invoquent une livraison exogène de matière organique à la Terre primitive. Par ailleurs, les collisions de NEOs avec la Terre présentent un risque non négligeable pour l'humanité. Pour toutes ces raisons, l'exploration de ces objets est particulièrement intéressante et urgente. Marco Polo nous permettra d'analyser les échantillons dans les laboratoires terrestres, obtenant de ce fait des mesures qui ne peuvent pas encore être effectuées *in situ* par une sonde spatiale robotique. Dans le détail, cette mission nous permettra de : 1) Déterminer les propriétés physiques et chimiques de la cible, caractéristique des planétésimaux présents dans la nébuleuse solaire primitive ; 2) Identifier les événements principaux (par exemple agglomération, chauffage, altération aqueuse, interactions du vent solaire...) qui ont influencé l'histoire de la cible ; 3) Déterminer le contexte géologique de sa surface. 4) Rechercher un matériel pré-solaire encore inconnu dans les météorites ; 5) Étudier la nature et l'origine des composés organiques sur la cible, particulièrement ceux qui peuvent contraindre l'origine des molécules pré-biotiques ; 6) Comprendre le rôle des impacts des petits corps dans l'origine et l'évolution de la vie sur la Terre.

Titan / Saturn System Mission (TSSM, ex-TandEM) est une mission de classe L, en collaboration avec la NASA, pour retourner dans le système de Saturne afin d'explorer *in situ* et de manière approfondie deux de ses satellites : Titan surtout mais aussi Encelade. Cassini et Huygens nous lèguent une longue liste de questions sur Titan qui sont directement liées à la nature de l'évolution planétaire, des processus physiques planétaires et à l'habitabilité des mondes. Les thèmes scientifiques qui seront abordés plus directement par TSSM sont : 1) L'environnement spatial de Titan ; 2) L'atmosphère neutre de Titan et d'Encelade ; 3) La surface de Titan et Encelade ; 4) La structure interne de Titan et Encelade ; 5) La formation et l'évolution des satellites ; 6). Le potentiel astrobiologique des deux mondes. Le concept actuellement à l'étude pour TSSM comprend un orbiteur (qui effectuerait des survols de Titan et Encelade avant de se mettre uniquement en orbite autour de Titan), une plateforme aérienne (Montgolfière) pour l'atmosphère de Titan, et une ou plusieurs sondes qui se poseraient sur Titan. L'architecture comporte plusieurs options dont un ou deux vaisseaux dont le lancement est prévu pour 2018 environ. De nouvelles techniques d'insertion en orbite, comme l'aérocapture et l'aérofreinage, seront aussi étudiées en tant qu'options. Nous avons constitué une charge utile préliminaire pour la mission TSSM qui mettra en oeuvre de nouveaux concepts, des nouvelles capacités observationnelles à la pointe de la technologie avec des instruments « classiques ». Une telle mission conduira sans aucun doute à d'importantes avancées technologiques par le développement de composants nouveaux. En particulier, la conception du ballon, des sondes, et des différents instruments, ainsi que la gestion du lancement, livraison et communications entre ces éléments permettront d'ouvrir de nouveaux domaines d'études pour les ingénieurs. Pour plus de détails sur TandEM et TSSM voir Coustenis et al. (2008b) et www.lesia.obspm.fr/cosmicvision/tandem.

Le LESIA a également une forte contribution scientifique sur la mission **Laplace/Europa Jupiter System Mission** dans le système de Jupiter (P Drossart participant au Science Definition Team). La mission Laplace (de classe L), renommée EJSM (Europa Jupiter System Mission) pour fusionner avec la mission NASA de classe Flagship nommée Europa Orbiter et une mission à plusieurs composantes : un satellite (NASA) destiné principalement à l'étude d'Europe, l'autre (ESA) à l'étude de Ganymède. Les deux composantes étudieront en complémentarité le système de Jupiter (atmosphère, magnétosphère); un troisième satellite (JAXA) dédié à la magnétosphère est aussi à l'étude. Les objectifs de la mission concernent la compréhension des mécanismes de couplage dans l'atmosphère de Jupiter et sa magnétosphère, la question de l'habitabilité des satellites Europe et Ganymède avec la présence probable d'un océan sous la croûte de glace. Le LESIA pourrait s'impliquer dans cette mission par la fourniture d'un spectro-imageur de nouvelle génération alliant haute résolution et imagerie pour l'étude à une résolution inégalée de l'atmosphère de Jupiter. Cet instrument, dans la lignée des études en R&D menées au LESIA depuis plusieurs années, pourrait aussi être adaptable à l'étude des oscillations planétaires globales (sismologie planétaire), permettant de sonder l'intérieur des planètes.

