

# MIRO / ROSETTA, convention 92532-BC n°U27

Code OTP : D-ROS0/85-01 / F. Rocard

## Rapport Scientifique et budgétaire 2011

*Par G. Beaudin, L. Girot et le MIRO team français*

### I. RAPPEL sur l'INSTRUMENT MIRO et sur ROSETTA:

MIRO (Microwave Instrument for the Rosetta Orbiter) a été embarqué sur la sonde cométaire ROSETTA.

MIRO est destiné à l'observation spectroscopique de 8 transitions de 6 molécules choisies pour leur importance scientifique sur l'étude des comètes: H<sub>2</sub>O, CO, CH<sub>3</sub>OH (3 raies), NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub><sup>17</sup>O, et H<sub>2</sub><sup>18</sup>O.

En mode continuum, deux bandes passantes larges à 1,6 et 0,5 mm de longueur d'onde, ayant une sensibilité de l'ordre de 1 K, permettent l'étude radiométrique du noyau cométaire et des astéroïdes.

Au niveau des objectifs scientifiques, MIRO se donne pour mission :

- La caractérisation globale de la sous-surface du noyau à des profondeurs de quelques centimètres.
- La mesure des abondances des constituants volatiles majeurs et certains rapports isotopiques clés.
- L'étude des processus contrôlant la sublimation à la surface du noyau et la formation de la coma interne.
- La caractérisation du noyau et la recherche de gaz et de jets : mesure thermique et recherche de H<sub>2</sub>O à de très faibles niveaux.

Le lancement de ROSETTA qui est intervenu le 2 mars 2004 a été suivi par la recette en vol jusqu'en fin 2004.

Ensuite, les éléments calendaires majeurs de la mission ont été les suivants :

- Assistance Gravitationnelle Terre 1 : Mars 2005
- Assistance Gravitationnelle Mars : Février 2007
- Assistance Gravitationnelle Terre 2 : Novembre 2007
- Survol astéroïde Steins : Septembre 2008
- Assistance Gravitationnelle Terre 3 : Novembre 2009
- Survol astéroïde Lutetia : Juillet 2010
- Entrée en hibernation de Rosetta : Juin 2011

Les prochaines dates clés seront :

- Rendez-vous avec la comète : Mai 2014
- Séparation de l'atterrisseur : Novembre 2014

Fin de la mission (après passage au périhélie) : Décembre 2015

## II. ACTIVITES MIRO :

### II. 1. Analyse des données de survol de l'astéroïde Steins :

Le continuum thermique de Steins a été détecté sur les 2 bandes passantes de MIRO. L'interprétation des données en terme de température de sous-surface et d'émissivité est délicate (difficultés provenant de la reconstruction d'attitude de Rosetta, non encore optimale). Les analyses montrent que l'inertie thermique est très faible (article publié). Pas de détection de vapeur d'eau autour de l'astéroïde.

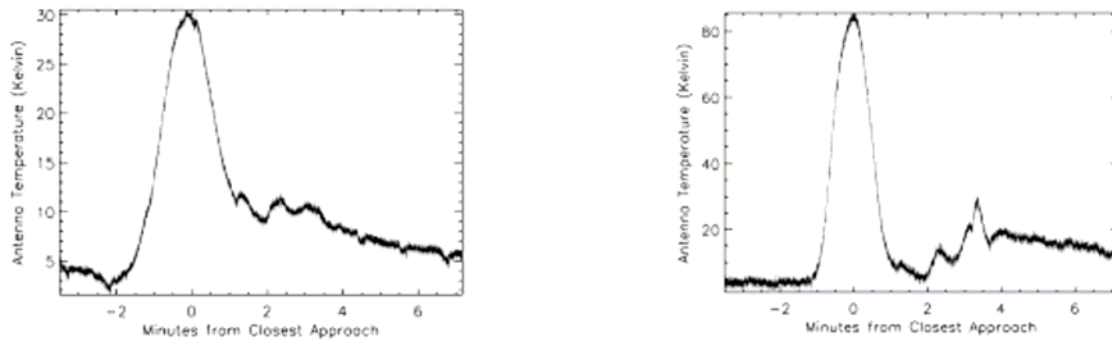


Figure : Mesures MIRO de l'astéroïde Steins à 1.6 mm (gauche) et 0.5 mm (droite)

### II.2. Bilan du survol de l'astéroïde Lutetia :

La sonde Rosetta a rencontré l'astéroïde (21) Lutetia le 10 juillet 2010. Pendant la rencontre, les voies continuum de l'instrument MIRO (à 1,6 et 0,5 mm de longueur d'onde) ont enregistré en continu la température de la sous-surface de l'astéroïde. Comme l'axe de rotation de Lutetia est (comme celui d'Uranus) proche du plan de l'écliptique, le point sub-solaire étant à  $47^\circ$  N au moment du survol, MIRO a pu mesurer à la fois les hémisphères jour et nuit sujets aux effets saisonniers d'ensoleillement. Les températures de la sous-surface (à des profondeurs de 2 mm à 2 cm) s'étalent de  $\sim 193$  K pour le côté jour à  $\sim 50$  K pour le côté nuit. La modélisation thermique et les calculs de transfert radiatif, comparés aux observations, montrent que les deux derniers centimètres de la surface ont une très faible inertie thermique : environ  $20 \text{ J}/(\text{K m}^2 \text{ s}^{0.5})$ . Cette inertie thermique semble augmenter significativement au dessous de cette profondeur. Ces propriétés sont proches de celle du régolithe lunaire, qui a une faible densité ( $\sim 1250 \text{ kg/m}^3$ ) et faible inertie thermique dans ses 1-2 cm supérieurs qui surmontent une partie plus compacte et d'inertie plus élevée. Un balayage juste après le survol a permis de préciser la dimension de l'astéroïde "côté nuit", mal connu par l'imagerie traditionnelle, et de mieux contraindre la taille de Lutetia.

La voie spectroscopique de MIRO (à 0,5 mm de longueur d'onde) a été utilisée pour rechercher une éventuelle exosphère entourant l'astéroïde Lutetia. MIRO permet de rechercher quatre molécules : CO,

CH<sub>3</sub>OH, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O (pour cette dernière, dans les trois variétés isotopiques <sup>16</sup>O, <sup>17</sup>O et <sup>18</sup>O). Bien que plus de 1000 spectres aient été obtenus pendant la rencontre, seuls les 7 spectres obtenus au moment de la plus faible approche sont exploitables. En effet, en raison de la grande vitesse relative, les raies moléculaires sont déplacées par effet Doppler en dehors de la bande passante du spectromètre pour les autres spectres. Les spectres sommés et lissés ne montrent pas de signal détecté ni en émission, ni en absorption sur le continuum de l'astéroïde. Ils ont été utilisés pour déterminer des limites supérieures des densités de colonne des quatre molécules et des taux de dégazage correspondants. Ces estimations dépendent du modèle adopté pour l'excitation des

molécules et des hypothèses sur leur origine. Pour des molécules issues de la sublimation de glaces avec une température de départ de 180 K, les limites sur les taux de dégazage sont de  $\sim 10^{23}$ ,  $10^{26}$ ,  $10^{24}$  et  $10^{23}$  molécules par seconde pour H<sub>2</sub>O, CO, CH<sub>3</sub>OH et NH<sub>3</sub>, respectivement. Le cas de molécules provenant du "sputtering" de la surface, à une température initiale plus élevée, a aussi été envisagé, et conduit à des limites plus basses.

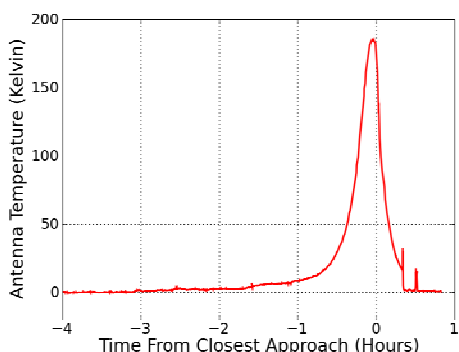


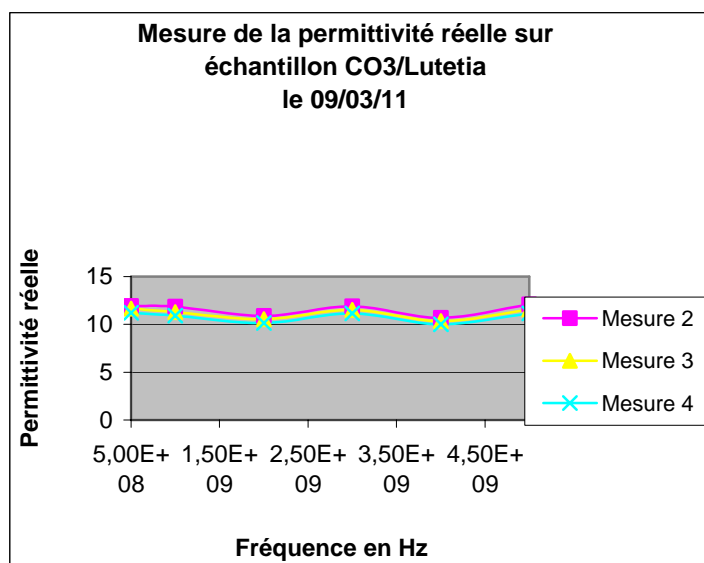
Figure : Mesures MIRO sur Lutetia dans le canal à 1.6 mm. Le 2<sup>ème</sup> « spike » après CA correspond à une manœuvre de Rosetta programmée pour que Miro puisse mesurer le 3<sup>ème</sup> axe de Lutetia.

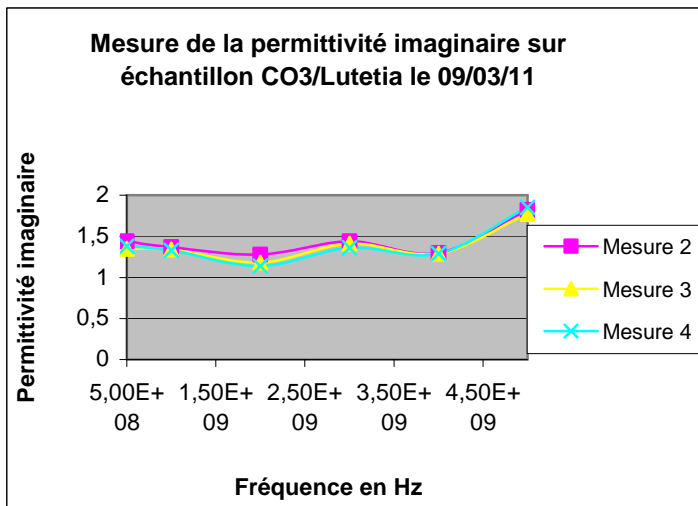
Une publication dans « Planetary & Space Science », dans le cadre d'un dossier spécial sur le survol de Lutetia, est acceptée (voir « Publications »).

### **II.3. Mesures de la constante diélectrique de roches aux fréquences de MIRO, CONSERT et de satellites de télédétection :**

Le passage de la sonde ROSETTA près des astéroïdes STEINS et LUTETIA a permis à la sonde MIRO de mesurer l'émissivité à 190 et 550 GHz de la surface et de la sous-surface de ces astéroïdes.

Une mesure très précise de la conductibilité thermique de Lutétia et de sa forme exacte (qu'aucun autre instrument n'a pu mesurer) ont permis de montrer que STEINS a une surface solide, tandis que LUTETIA est recouvert d'un régolithe de type lunaire. La mesure de météorites trouvés dans l'Antarctique (ambrite et diogénite) au laboratoire a donné pour la partie réelle et imaginaire de la constante diélectrique des valeurs expliquant bien l'émissivité de ces astéroïdes aussi bien sur la face éclairée par le soleil que la face dans l'ombre.





Ces travaux très encourageants vont être amplifiés pour permettre l'analyse de la surface du noyau cométaire CHURYUMOV-GERASIMENKO à ces longueurs d'onde. Des mesures basse fréquence seront effectuées simultanément pour préparer la tomographie de ce noyau cométaire avec le radar CONSERT. Une quarantaine de kg d'échantillons ont été collectés au MHN de Paris et au Département TEB de l'UPMC. Ces mesures seront également utilisées par l'équipe de C. Prigent (5 personnes) pour la télédétection millimétrique et submillimétrique de la surface terrestre.

Participants aux mesures :

Y. Brouet Doctorant ED127

P. Encrenaz Astronome émérite LERMA

G. Beaudin IRHC LERMA

M. Gheudin Ch associé LERMA

G. Ruffié IR1 PIOM Bordeaux

A.C Levasseur Regourd prof. UPMC

#### **II. 4. Modélisation cométaire :**

Il s'avère que les observations de MIRO seront capitales pour estimer la force aérodynamique subie par le lander au cours de sa descente. MIRO est un instrument très sensible pour l'étude du dégazage de l'eau à grande distance héliocentrique, et la caractérisation du champ de vitesse du gaz.

A cette fin, une modélisation des spectres MIRO qui pourraient être acquis pendant cette phase d'investigation a débuté et utilise les compétences de Vladimir Zakharov en matière de transfert de rayonnement et hydrodynamique. Le modèle 3D de transfert de rayonnement utilise les simulations hydrodynamiques effectuées par J.-F. Crifo et V. Zakharov (SA) de l'environnement proche de la comète à 3 AU du soleil (Figure ci-dessous), pour un noyau dont la forme s'approche de celle déduite des données du HST par Lamy et al. Ce modèle hydrodynamique est le modèle de référence fourni au CNES pour les premières estimations de la force aérodynamique agissant sur le lander. Une réunion a lieu au CNES (Toulouse) une fois par an (organisées par P. Gaudon et réunissant des membre du GRGS) pour faire état de l'avancement de ces travaux).

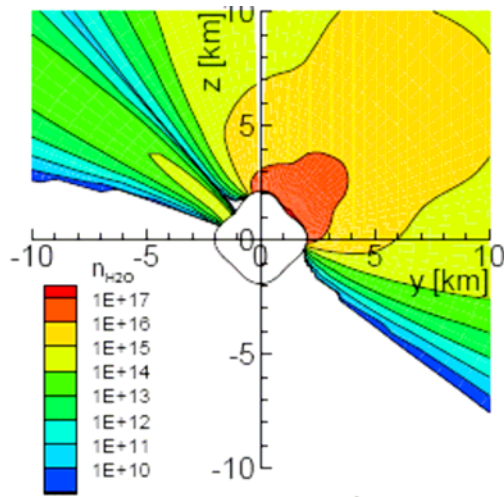


Fig. 1 Distribution of water density ( $\text{m}^{-3}$ ) in the  $(y,z)$  plane in the vicinity of the nucleus [1]. The direction of the Sun is  $(0.5, 0.5, 0.707)$  in  $(x,y,z)$  coordinates.

Des simulations pour différentes géométries d'observations MIRO (phases de Global Mapping, Close observation, observations nadir ou au limbe) ont été effectuées (Figure ci-dessous).

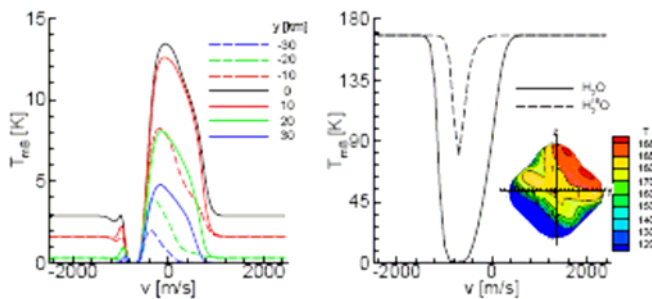


Fig. 2 Variation of line profiles versus off-set position of the beam (left) and for nadir view (right). The surface temperature map is shown. The line of sight is along the  $x$ -axis. The spacecraft-nucleus distance is  $10^4$  km (left) and 100 km (right.)

L'utilisation de MIRO en support du lander Philae (sélection du site) est envisagée. De plus MIRO pourra obtenir des résultats scientifiques originaux lors des premières phases d'observation de 67P loin du Soleil, en raison de sa grande sensibilité. Un programme d'observation pour les phases « pré-landing » a été soumis aux groupes de travail scientifiques chargés d'établir les scénarios d'observations des instruments de Rosetta.

Le programme de transfert de rayonnement simulant des spectres synthétiques dans les conditions géométriques d'observation de MIRO est opérationnel pour des conditions ETL (Equilibre Thermodynamique Local). Ce programme a été adapté en 2008 pour traiter l'excitation et le transfert de rayonnement de CO. Les résultats du programme ont été confrontés aux programmes similaires développés au JPL et au Max Planck Institute de Lindau (partenaires sur l'instrument MIRO) afin de valider ces trois codes. Des échanges sont en cours pour l'extension à des conditions hors-ETL (transfert de connaissances de Meudon vers le JPL). L'instrument MIRO est maintenant présenté dans plusieurs publications. Le modèle d'excitation-transfert des raies de la molécule d'eau dans les atmosphères cométaires pour interpréter les observations d'Odin et préparer celles d'Herschel et de MIRO a été également publié (Zakharov et al. 2007).

## II-5 Analyse des données MIRO obtenues lors des survols de la Terre

Nous avons entrepris d'analyser les données enregistrées par MIRO lors des trois survols de la Terre par la sonde Rosetta (mars 2005, novembre 2007 et novembre 2009). L'objectif était d'une part de vérifier les performances de l'instrument, et d'autre part d'analyser l'intérêt de ces mesures pour l'observation de la Terre, par comparaison aux jeux de données existants. L'étude a été menée en collaboration avec l'équipe de Télédétection atmosphérique du LERMA (C. Prigent et al.).

Nous avons focalisé l'étude sur les données du 2<sup>ème</sup> flyby qui présentaient la meilleure qualité. Les données ont été obtenues dans le mode Astéroïde, ce qui permet d'obtenir les valeurs absolues des flux dans 8 bandes de fréquence correspondant à  $\text{H}_2^{16}\text{O}$  (557 GHz),  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  (548 GHz),  $\text{H}_2^{17}\text{O}$  (552 GHz), CO (576 GHz),  $\text{NH}_3$  (572 GHz) et  $\text{CH}_3\text{OH}$  (553, 569 et 579 GHz) ainsi que dans le continu submillimétrique. Une centaine de spectres ont été obtenus le long de la séquence. La raie de  $\text{H}_2^{16}\text{O}$  à 556.936 GHz est clairement identifiée sur chaque spectre individuel (Fig. a1). La raie  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  à 547.677 GHz est détectable sur la sommation (Fig. a2).

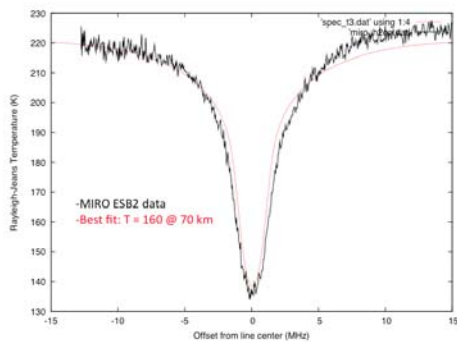


Figure a1. La raie de  $\text{H}_2^{16}\text{O}$  à 556.936 GHz observée par MIRO à une résolution spectrale de 44 kHz. Les données sont sommées sur l'ensemble de la séquence ESB2. L'analyse des spectres individuels montre qu'il n'y a pas de variation du signal le long de la séquence. La courbe rouge montre le modèle synthétique.

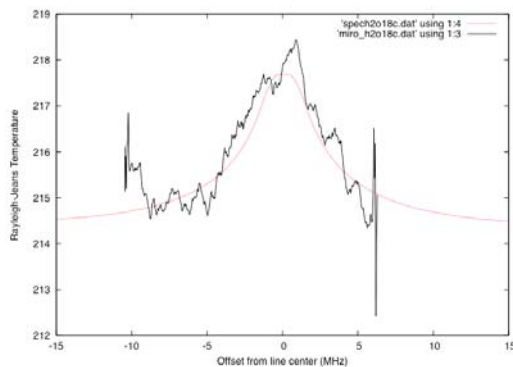


Figure a2. La raie de  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  à 547.676 GHz observée par MIRO à une résolution spectrale de 44 kHz, intégrée sur l'ensemble de la séquence ESB2. La courbe rouge montre le modèle synthétique.

Nous avons utilisé les mesures du flux continu dans chaque canal pour mesurer les ailes de la raie  $\text{H}_2\text{O}$  à 557 GHz et pour contraindre le profil thermique de la Terre, à la fois dans les ailes lointaines (au delà de 2 GHz du centre de la raie) qui sondent la troposphère et dans la partie centrale de la raies ( $\pm 2$  GHz du centre de la raie) qui sonde la stratosphère. Cette analyse au premier ordre nous permet de conclure à un profil plus chaud que le profil nominal de départ dans la troposphère, et plus froid dans la stratosphère (fig. 3a). Ces résultats sont compatibles avec les conditions d'observations (hautes latitudes sud au printemps).

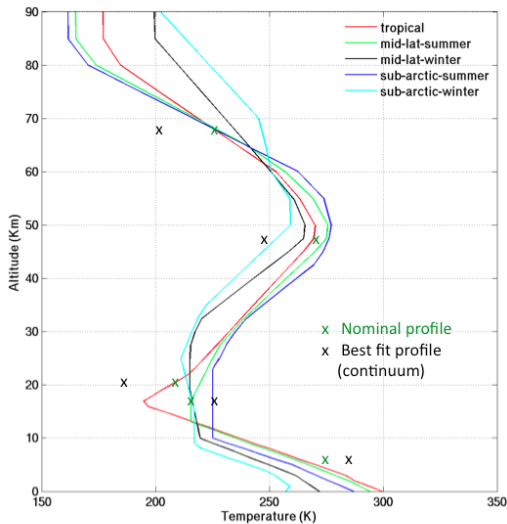


Figure a3. Inversion au premier ordre du profil thermique terrestre à partir des données submillimétriques de MIRO. Croix vertes : profil nominal ; croix noires : profil MIRO. Les courbes en couleur correspondent à différents modèles atmosphériques (C. Jimenez, C. Prigent et al.)

L'analyse des données nous a permis de mettre en évidence une anomalie dans deux des canaux ( $\text{H}_2^{18}\text{O}$  et  $\text{CH}_3\text{OH}$  à 579.151 GHz) dont la transmission apparaît inférieure à la valeur attendue par un facteur 5 à 10%. Cette anomalie pourrait être liée à la valeur élevée de la fréquence intermédiaire de ces deux canaux (> 15 GHz).

Cette étude a fait l'objet d'un rapport qui a été présenté lors du Science Team de MIRO à Paris en octobre 2011.

Participants : T. Encrenaz, S. Gulkis, S. Lee, en collaboration avec C. Prigent et C. Jimenez (LERMA).

### III. PROGRAMME DES ACTIVITES MIRO (en cours) :

- Analyse des données continuum sur la Lune (survol Terre-Lune Nov 09)
- Poursuite de la modélisation des spectres cométaires: utilisation du modèle hors-ETL pour l'excitation, optimisation des codes en temps de calcul.
- Développement d'un modèle d'inversion des spectres MIRO, permettant de déduire quelques paramètres clés (température, vitesse, taux de production) de ces spectres.
- Modélisation de l'émission thermique de la poussière et étude de détectabilité avec MIRO.
- Poursuite des mesures des constantes diélectriques de matériaux météoritiques (avec le PIOM, Bordeaux) pour MIRO/Consert/IR proche,
- Les raies de  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  et  $\text{NH}_3$  couvertes par MIRO ont été observées dans plusieurs comètes avec le télescope spatial Herschel. Leur cartographie, complétée par l'observation de nombreuses raies rotationnelles de l'eau, a permis d'affiner les modèles d'excitation des molécules dans les comètes. Le taux d'excitation collisionnel par interaction avec les électrons a pu être mesuré, confirmant des résultats obtenus à partir du satellite Odin. Ces nouvelles mesures seront intégrées dans le modèle d'analyse des données MIRO.

- Poursuite de l'analyse des données MIRO acquises au cours des survols de la Terre (T. Encrenaz, S. Gulkis, G. Beaudin, N. Biver, J. Crovisier, P. Encrenaz, C. Prigent, E. Defer,...). Une analyse plus poussée de l'inversion du profil thermique a été entreprise par C. Jimenez, C. Prigent et l'équipe du LERMA. Les résultats seront comparés aux autres données existantes. Une communication est prévue à l'assemblée générale de l'EGU en avril 2012.

#### **IV. ACTIVITES GENERALES / MIRO et ROSETTA:**

- Participation régulière aux SWT meetings (2 par an) :  
17-19 mai 2011 a Darmstadt (2p)  
15-17 novembre 2011 a Noordwijk (1p)
- Implication de l'équipe MIRO dans les working groups scientifiques de Rosetta ainsi que dans le « Science Operation Working Group » (SOWG) ;
- Conférence sur MIRO et survols des astéroïdes au CNES à Toulouse et à EADS (IAS, cadre des CCT) par G. Beaudin.
- Réunion avec Jens Biele (chair WG1 – working group lander) à Rome : discussion sur les mesures MIRO qui permettront de préparer la phase lander.
- D. Bockelée-Morvan est co-chair (avec C. Engrand, CSNSM) du Rosetta « Working Group 2 » (Propriétés chimiques). Trois Working Group ont été en effet mis en place par l'ESA en 2007 pour planifier les analyses multi-instruments qui seront faites lors du rendez-vous avec la comète en 2014. Les tâches du WG2 incluent l'identification de Scénarios de Mission, l'optimisation des séquences de mesures (limitation de puissance, télémétrie) et la coordination des différents instruments. Les étapes franchies par le WG2 ont été : 1) l'élaboration d'une table décrivant les capacités analytiques de chaque instrument ; 2) l'identification des complémentarités et des mesures en commun des différents instruments ; 3) une réflexion sur les améliorations à apporter sur la « Science Theme Table », avant sa mise en ligne sur Internet, avec accès interactif (travail avec V. Dhiri et C. Vallat de RSOC). Le WG2 travaille maintenant en étroite collaboration avec le Science Ground Segment (basé à l'ESAC) sur la planification des opérations après largage du lander (« Baseline Planning »). Un « skeleton plan » pour le premier mois d'opération à 2.9 AU du Soleil a été élaboré à l'automne 2010. Les activités de D. Bockelée-Morvan concernant le WG2 sont financées sur les crédits MIRO.
- ***Le consortium MIRO s'est réuni à Paris du 10 au 12 Octobre 2011.***  
Ce «MIRO Science Team Meeting» a été organisé à l'Observatoire de Paris, rassemblant une vingtaine de personnes dont 8 du JPL, 1 du MPAe, 1 de l'ESTEC et 9 français (essentiellement de l'Obs LESIA et LERMA).  
L'objectif de ce team meeting était de prioriser les objectifs scientifiques de MIRO, d'évaluer les trajectoires de Rosetta autour de la comète fournies par l'ESOC, d'étudier l'apport de MIRO pour la caractérisation du noyau et de l'environnement de 67P dans le contexte des activités "lander" (choix du site d'atterrissage, sécurisation de l'atterrissage), et de discuter des synergies avec les autres instruments sur l'orbiteur. La stratégie des publications, l'archivage et l'accès aux données MIRO sur les serveurs du JPL ont été discutés. Plusieurs présentations scientifiques ont été données, faisant état des développements théoriques et expérimentaux en cours, ou de l'analyse de données MIRO (données sur Lutetia, la Terre et C/2002 T7 LINEAR) et Herschel."

A cette occasion, une célébration des «NASA MIRO Team Awards» a eu lieu salle Cassini.

## V. ENGAGEMENTS BUDGETAIRES :

U27 MIRO - Rosetta **9 200,00 €** de missions en 2011 (2 x SWT Rosetta, ESOC ; Symposium ACM, Japon ; MIRO team meeting Gottingen).

Le Symposium au Japon a été annulé et le MIRO Team meeting a eu lieu à Paris (organisé à l'Observatoire).

Les engagements/ facturations budgétaires 2011 ont porté sur :

- 2 missions JPL (groupes de travail MIRO) : 1600 + 3500 = 5400 €
- 1 missions « SWT » ESTEC : 780 €
- 1 mission « réunion WG 2 » ESTEC : 480 €
- 2 missions « SWT » Darmstadt : 1480 €
- 2 missions au PIOM Bordeaux: 500 €
- 2 missions Toulouse CNES-IAS et EADS : 540 €

**Total engagé/ facturé sur budget 2011: 9180 €**

## VI. PUBLICATIONS :

Millimeter and submillimeter measurements of asteroid (2067) Steins during the Rosetta fly-by.

Gulkis, S., Keihm, S., Kamp, L., Backus, C., Janssen, M., Lee, S., Davidsson, B., Beaudin, G., Biver, N., Bockelée-Morvan, D., Crovisier, J., Encrenaz, P., Encrenaz, T., Hartogh, P., Hofstadter, M., Ip, W., Lellouch, E., Mann, I., Schloerb, P., Spilker, T., Frerking, M. 2010, Planet. Space Scie., 58, 1077D1087

Continuum observations of asteroids (2867) Steins and (21) Lutetia with the MIRO Millimeter and Submillimeter Instrument on the ESA Rosetta spacecraft. Gulkis, S., Keihm, S., Kamp, L., Lee, S., Janssen, M., and the MIRO team. 2010, European Planetary Science Congress, EPSC Abstracts Vol. 5, EPSC2010-717

Millimeter and submillimeter continuum observations of asteroid (21) Lutetia with MIRO instrument on the ESA Rosetta spacecraft. S. Gulkis, S. Keihm, L. Kamp, Seungwon Lee, M. Hofstadter, M. Janssen, J. Crovisier, and the MIRO team. Vol. 13, EGU2011-2784-1, 2011 EGU General Assembly, Vienna, Austria, 3-8 April 2011

Submillimeter spectroscopic observations of asteroid (21) Lutetia with MIRO instrument on the ESA Rosetta spacecraft. Seungwon Lee, S. Gulkis, M. Hofstadter, P. von Allmen, J. Crovisier, N. Biver, and D. Bockelée-Morvan. Vol. 13, EGU2011-5009-2, 2011 EGU General Assembly, Vienna, Austria, 3-8 April 2011.

MIRO Observation of Comet C/2002 T7 (LINEAR) Water Line Spectrum  
S. Lee, M. Frerking, M. Hofstadter, S. Gulkis, P. von Allmen, J. Crovisier, N. Biver, and D. Bockelée-Morvan EPSC-DPS 2011,

Laboratory dielectric constant determination for planetary surface characterization. Y. Brouet, A.C. Levasseur-Regourd, P. Encrenaz, M. Gheudin, G. Ruffié, and S. Gulkis. EPSC-DPS 2011,

Analysis of Earth Atmosphere Water spectral line data from space using the MIRO instrument on Rosetta s/c S. Gulkis (1), T. Encrenaz (2), S. Lee (1), M. Janssen (1), L. Kamp (1), C. Prigent (3), G. Beaudin (3), N. Biver (2), J. Crovisier (2), E. Defer (3), P. Encrenaz (3), V. Galligani (3), C. Jimenez (3), +... and the MIRO Team (1) JPL, Pasadena, CA, USA, (2) LESIA, Paris Observatory (3) LERMA, Paris Observatory. MIRO scientific team meeting, Paris Oct 2011 (et sera présenté à l'assemblée générale de l'EGU en avril 2012).

**New:**

Continuum and spectroscopic observations of asteroid (21) Lutetia at millimeter and submillimeter wavelengths with the MIRO instrument on the Rosetta spacecraft. S. Gulkis, S. Keihm, L. Kamp, S. Lee, P. Hartogh, J. Crovisier, E. Lellouch, P. Encrenaz, D. Bockelée-Morvan, M. Hofstadter, G. Beaudin, M. Janssen, P. Weissman, P.A. von Allmen, T. Encrenaz, C.R. Backus, W-H. Ip, P.F. Schloerb, N. Biver, T. Spilker, I. Mann. 2011, *Planetary & Space Science* (special issue on the Lutetia flyby), PSS1798R1, accepted by the editor for publication Dec 6<sup>th</sup> 2011.