

# APPLICATIONS DE L'IMAGERIE HYPERSPÉCTRALE À L'ÉTUDE DES PLANÈTES DU SYSTÈME SOLAIRE : LE CAS DE MARS ET DE TITAN

S. LE MOUÉLIC<sup>1,2</sup>, C. SOTIN<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Université de Nantes, Laboratoire de Planétologie et Géodynamique, 2 rue de la Houssinière, 44322 Nantes Cedex 03, France.

<sup>2</sup>CNRS, UMR-6112, 2 rue de la Houssinière, 44322 Nantes Cedex 03, France.

<sup>3</sup>Jet Propulsion Laboratory, M/S 183-501, 4800 Oak Grove Drive, Pasadena, CA 91109, USA.

## RÉSUMÉ

*Cet article a pour objectif d'illustrer les résultats acquis par différentes expériences d'imagerie hyperspectrale ayant été embarquées sur les sondes d'exploration du Système Solaire, avec pour but la détermination de la composition minéralogique des surfaces planétaires. Les cas de Mars et de Titan sont plus particulièrement détaillés. Sur Mars, le spectro-imageur OMEGA à bord de la sonde Mars Express arrivée en décembre 2003 (suivi par l'instrument CRISM sur la sonde américaine Mars Reconnaissance Orbiter en 2006), a permis de détecter directement la glace d'eau sur les calottes polaires, mais aussi de détecter et cartographier la distribution de minéraux tels que les pyroxènes, les olivines, des sulfates, des oxydes de fer et surtout des phyllosilicates (argiles). La présence de ces minéraux fournit des contraintes fortes sur le passé climatique de Mars. Depuis Octobre 2004, l'imageur hyperspectral VIMS à bord de la sonde CASSINI permet quant à lui de cartographier la surface de Titan, le plus gros satellite de Saturne, à travers son épaisse atmosphère constituée principalement d'azote et de méthane, qui est complètement opaque au rayonnement visible. Il permet également d'étudier Saturne et ses satellites de glace avec, notamment, la détection de CO<sub>2</sub> sur Japet et de glace d'eau dans le panache d'Encelade.*

## MOTS CLÉS

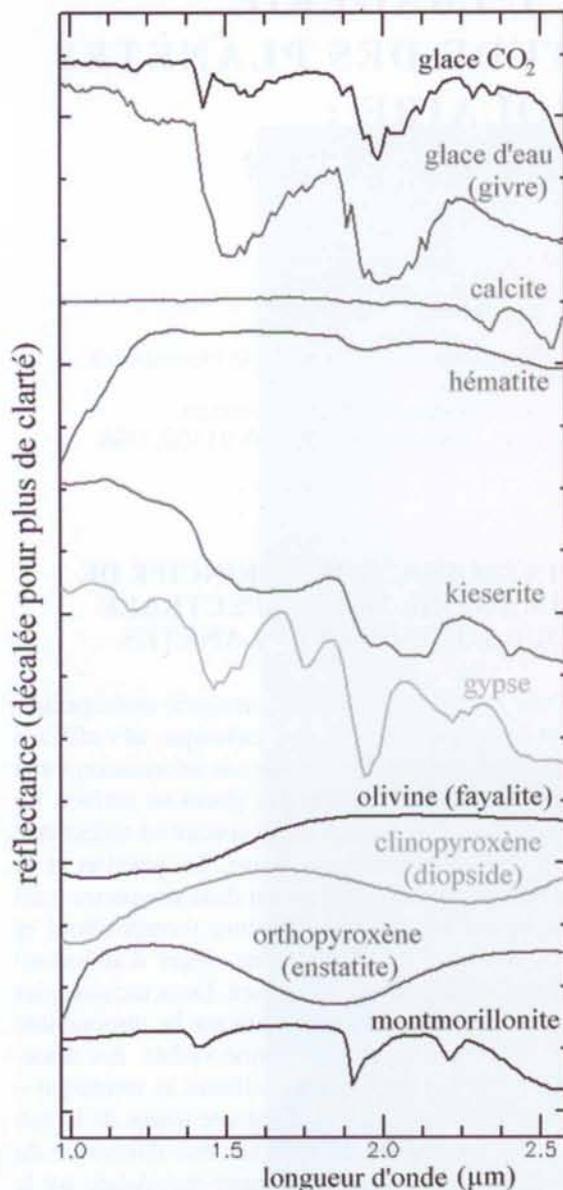
*Téledétection, Infrarouge, Hyperspectral, Planètes, Mars, Titan.*

Article remis le 24 octobre 2007, accepté définitivement le 9 novembre 2007.

## 1. INTRODUCTION : PRINCIPE DE L'IMAGERIE HYPERSPÉCTRALE POUR L'ÉTUDE DES PLANÈTES

Pour l'étude des planètes, l'imagerie multispectrale et hyperspectrale est une technique très efficace pour obtenir à l'échelle globale une information sur la composition des roches et des glaces en surface. Le principe consiste à acquérir un spectre en réflectance pour chaque pixel d'une image. La position et la forme des bandes d'absorption dans ce spectre nous renseignent ensuite sur la nature (composition) et l'état physique (taille de grains, degré d'altération) des matériaux présents en surface. Deux technologies sont couramment utilisées, suivant la disponibilité des détecteurs. Dans le domaine visible, des détecteurs CCD bidimensionnels utilisent la technique « *pushbroom* » pour reconstituer une image de la surface. Le spectre est dispersé sur une dimension du détecteur, et une ligne de l'image enregistrée sur la deuxième dimension du capteur. Le défilement de la sonde permet ensuite d'acquérir la deuxième dimension spatiale de l'image. Dans l'infrarouge, plusieurs instruments utilisent la technologie « *whiskbroom* » : le spectre est dispersé sur une barrette de détecteurs. Chaque ligne de l'image est obtenue par la rotation d'un miroir et la deuxième dimension de l'image est créée soit par le défilement de la trace au sol du satellite (cas d'OMEGA sur la sonde Mars Express), ou bien par un deuxième miroir perpendiculaire au premier (cas de VIMS sur la sonde CASSINI).

Le domaine visible et proche infrarouge est un domaine particulièrement intéressant, car il contient des signatures spectrales caractéristiques des principaux minéraux, ainsi que des glaces couramment rencontrées dans le Système Solaire. La **Figure 1** montre une sélection de spectres en réflectance représentatifs des grandes familles de minéraux.



**Figure 1 :** Exemple de spectres de glace de CO<sub>2</sub>, de glace d'eau, et de minéraux constituant les surfaces planétaires. Les spectres en réflectance sont extraits des bibliothèques speclib05 de l'USGS et CRISM ([http://pds-geosciences.wustl.edu/missions/mro/spectral\\_library.htm](http://pds-geosciences.wustl.edu/missions/mro/spectral_library.htm)), sauf le spectre de CO<sub>2</sub> qui est extrait des données martiennes OMEGA.

Les informations fournies par l'imagerie hyperspectrale visible et proche infrarouge sont très complémentaires de celles obtenues par d'autres techniques, telles que les spectromètres à rayons gamma et à neutrons (présents sur la sonde Lunar Prospector en 1998 puis sur la sonde Mars Odyssey en 2001) qui donnent une indication à basse résolution spatiale (> 100 à 200 km/pixel) sur la composition élémentaire (Elphic *et al.*, 1998 ; Chevrel *et al.*, 2002 ; Feldman *et al.*, 2002). Elles sont également très complémentaires de celles obtenues dans l'infrarouge thermique, notamment par l'instrument TES sur la sonde Mars Global Surveyor, arrivée autour de Mars en 1996 (Christensen *et al.*, 2001).

L'objectif de cet article est, après avoir brièvement rappelé les résultats acquis par les tout premiers spectro-imageurs embarqués, d'illustrer ceux des imageurs hyperspectraux actuellement en fonctionnement sur les sondes spatiales à destination de Mars et du système de Saturne.

## 2. LES PREMIÈRES EXPÉRIENCES HYPERSPECTRALES : ISM/PHOBOS 2 ET NIMS/GALILEO

La première sonde spatiale équipée d'un capteur hyperspectral (instrument ISM ou Infrared Mapping Spectrometer) était la sonde russe Phobos 2. Elle a été lancée le 21 juillet 1988, et est restée deux mois en orbite martienne du 29 janvier au 27 mars 1989. ISM a été développé par l'Institut d'Astrophysique Spatiale d'Orsay et le Département de Recherches Spatiales (DESPA) de Meudon. Cet instrument a permis d'obtenir 30 000 spectres de la surface de Mars dans le domaine 0,75 – 3,2 µm, avec une résolution spatiale variant entre 7 et 25 km par pixel. Ces observations ont permis de réaliser les premières cartes minéralogiques des régions équatoriales de la planète (Bibring *et al.*, 1989, Erard *et al.*, 1991), mettant notamment en évidence la présence de signatures de pyroxènes au niveau d'édifices volcaniques tels que le bouclier de Syrtis (Mustard *et al.*, 1993). Elles ont également permis d'étudier les propriétés physiques de l'atmosphère de Mars, constituée principalement de CO<sub>2</sub> et de composés mineurs (Rosenqvist *et al.*, 1992). La sonde a malheureusement été perdue prématurément au bout de 2 mois. Elle a cependant permis de valider le concept d'imagerie hyperspectrale, et permis de poser des jalons pour un instrument de seconde génération (OMEGA) dont il sera question par la suite.

En 1996, la sonde américaine Galileo est arrivée dans le système de Jupiter avec à son bord l'expérience NIMS (Near Infrared Mapping Spectrometer). NIMS, travaillant dans le domaine 0,7 – 5,2 µm, est la première expérience spatiale de spectro-imagerie sur les planètes géantes. Cet instrument avait une résolution spectrale ajustable entre 17 et 408 canaux spectraux. Il a notamment permis de déterminer la composition des surfaces des satellites galiléens : matériaux volcaniques soufrés pour Io (Carlson *et al.*, 1997) et glace d'eau principalement pour Callisto, Ganymède et Europe (Carlson *et al.*, 1996), avec localement des traces de molécules plus complexes. La présence de sels tels que l'hexahydrate (MgSO<sub>4</sub>.6H<sub>2</sub>O) a été proposée au niveau des réseaux de fractures qui strient la surface d'Europe (McCord *et al.*, 1998). Ce satellite possède, sous sa croûte constituée principalement de glace d'eau, un océan d'eau liquide en contact avec des silicates. C'est donc peut-être un

environnement favorable à l'apparition de la vie, par analogie avec les fumeurs noirs des dorsales océaniques sur Terre. Il sera probablement l'une des cibles prioritaires des prochaines missions d'exploration à destination des planètes géantes.

### 3. LA DÉCOUVERTE DE LA DIVERSITÉ MINÉRALOGIQUE DE MARS : L'ARRIVÉE DES SONDES MARS EXPRESS PUIS MARS RECONNAISSANCE ORBITER

#### 3.1. Le spectro-imageur OMEGA/Mars Express

Dans la continuité de l'expérience ISM de la sonde Phobos 2, l'Institut d'Astrophysique Spatiale d'Orsay a développé, en collaboration avec l'IFSI à Rome et l'IKI à Moscou, un instrument de seconde génération : OMEGA (Observatoire pour la Minéralogie, l'Eau, les Glaces et l'Activité). OMEGA devait initialement se trouver sur la sonde MARS 96, dont le lancement s'est soldé par un échec. La doublure de l'instrument, modifiée pour tenir compte de nouvelles contraintes électroniques, a finalement été embarquée sur la sonde européenne Mars Express, qui s'est mise en orbite martienne en décembre 2003 (Bibring *et al.*, 2004a). Les principales caractéristiques d'OMEGA sont résumées dans le **tableau 1**. L'orbite polaire de la sonde étant elliptique, les images ont une résolution spatiale variant entre 0,3 et 4 kilomètres par pixel. Pour chaque pixel de l'image, on dispose d'un spectre de 352 canaux couvrant le domaine 0,35 à 5,2  $\mu\text{m}$ . L'objectif initial, sur les deux années de la mission nominale, était de couvrir ~ 5% de la surface à haute résolution, et d'effectuer une couverture quasi globale à moyenne résolution spatiale. Cet objectif est aujourd'hui largement dépassé.

Dès son arrivée, la sonde a permis de récolter des données d'un intérêt majeur. En effet, mis à part ISM dont les capacités étaient bien moindres, aucun imageur hyperspectral visible-proche infrarouge n'avait jamais volé sur une mission martien-

|                      | VNIR                    | SWIR                    | LWIR                   |
|----------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|
| Détecteur            | Matrice Si              | Barette InSb            | Barette InSb           |
| Mode d'observation   | Push-broom              | Whisk-broom             | Whisk-broom            |
| Gamme spectrale      | 0,35-1,05 $\mu\text{m}$ | 0,94-2,70 $\mu\text{m}$ | 2,65-5,2 $\mu\text{m}$ |
| Résolution spectrale | 7,5 nm                  | 14 nm                   | 21 nm                  |
| Nombre de canaux     | 96                      | 128                     | 128                    |

**Tableau 1.** Caractéristiques du spectro-imageur OMEGA de la sonde Mars Express.

ne. La première découverte, quelques semaines après le début des opérations, a été la mise en évidence directe de la composition des calottes polaires. Des signatures spectrales caractéristiques de la glace d'eau et de la glace de  $\text{CO}_2$ , parfaitement identifiables dans les spectres (voir la **figure 1**), ont permis de montrer que la calotte polaire sud de Mars était constituée de glace de  $\text{CO}_2$  recouvrant une calotte de glace d'eau (Bibring *et al.*, 2004b). La **Planche 1, page 43** montre un exemple de cartographie des glaces d'eau et de  $\text{CO}_2$  sur la calotte sud de Mars (orbite numéro 0041\_1). L'image de gauche est une composition colorée (Rouge = 1,5  $\mu\text{m}$ , Vert = 1,3  $\mu\text{m}$ , Bleu = 1,08  $\mu\text{m}$ ) mettant en évidence les différentes unités. L'image du milieu correspond à la profondeur de la bande à 1,5  $\mu\text{m}$  de la glace d'eau, calculée par la formule classique  $1 - 2 * R_{1,5} / (R_{1,3} + R_{1,7})$  (Clark et Roush, 1984). Des absorptions atteignant 25 % sont détectées en périphérie de la calotte. L'image de droite sur la **Planche 1, page 43** donne la profondeur de la bande étroite à 1,4  $\mu\text{m}$  du  $\text{CO}_2$ , calculée par la formule  $1 - 2 * R_{1,43} / (R_{1,46} + R_{1,40})$ . L'absorption atteint cette fois jusqu'à 30 %, ce qui indique que la calotte est recouverte de glace de  $\text{CO}_2$ , la glace d'eau étant stratigraphiquement en dessous et affleurant sur les bords. La variation de la profondeur des bandes d'absorption à 1,5 et 2  $\mu\text{m}$  de la glace d'eau a également permis de discriminer les glaces saisonnières (dépôt de givre) des glaces plus pérennes, présentant des tailles de grains plus grandes, et de suivre l'évolution saisonnière de ces calottes (Langevin *et al.*, 2005a ; Langevin *et al.*, 2007).

La cartographie progressive de la surface de Mars a permis de révéler la diversité de la minéralogie des terrains martiens. La **Planche 2, page 44** montre une sélection de spectres OMEGA représentatifs de la diversité minéralogique observée. L'ensemble des terrains anciens de l'hémisphère sud présente des signatures de clinopyroxènes et orthopyroxènes en quantité variables, détectés grâce à la présence de bandes d'absorption à 1 et 2  $\mu\text{m}$ , la position exacte du centre bande étant principalement dépendante de la teneur en calcium (Bibring *et al.*, 2005). La **Planche 2, page 44** (spectres 1 et 2) montre deux exemples au niveau de la zone volcanique de Syrtis Major. Les deux cartes en bas à gauche de la **Planche 2, page 44** montrent la répartition globale des clinopyroxènes et orthopyroxènes déduite d'une analyse par mélanges linéaires (Le Mouélic *et al.*, 2006). Des signatures d'olivine ont été détectées (mais seulement très localement) au niveau d'édifices volcaniques importants comme le bouclier de Syrtis Major (Mustard *et al.*, 2005, Mustard *et al.*, 2007). Le spectre n°3 sur **Planche 2, page 44** est caractéristique de ce type de terrains. Ces minéraux mafiques montrent l'importance de l'activité volcanique dans la mise en place de la croûte martienne.

Certains modèles prédisaient que l'on devait trouver des carbonates en grande quantité sur Mars (Carr, 1986). Ces roches, sur Terre, sont le réservoir principal du CO<sub>2</sub> initialement présent dans l'atmosphère. Pourtant, aucune signature de carbonate n'a pu être détectée dans les données OMEGA (Bibring *et al.*, 2005). En revanche, les premières données récoltées ont montré la présence, de manière très localisée, de sulfates. Une grande étendue de gypse a notamment été mise en évidence au bord de la calotte polaire Nord (Langevin *et al.*, 2005b). Le spectre 5 de la **Planche 2, page 44** illustre ce type de terrain, dont la répartition est reproduite en bas à droite de la **Planche 2, page 44**. Des dépôts de sulfates mono-hydratés (de type kieserite, un sulfate de magnésium) ou bien polyhydratés ont également été mis en évidence, principalement au niveau du gigantesque canyon Valles Marineris (Gendrin *et al.*, 2005). Ces dépôts sont généralement associés à des dépôts stratifiés clairs, et présentent également des signatures d'oxydes de fer très marquées soit dans les affleurements, soit à leur pied (Bibring *et al.*, 2007). La genèse de ces terrains particuliers est probablement similaire à ce qu'a pu observer sur place le rover « Opportunity », qui s'est posé en janvier 2004 sur le site de Meridiani Planum, et qui a étudié des affleurements rocheux riches en sulfates contenant des inclusions sous forme de sphérules d'hématite. Suite à l'érosion de la matrice de sulfates, ces sphérules d'hématite s'accumulent sur le sol, et renforcent la signature spectrale (principalement une bande large à 0,85-1 µm) observée depuis l'orbite. Le spectre n° 5 sur la **Planche 2, page 44**, extrait d'une observation de la zone d'Aram Chaos, est caractéristique des signatures ferriques observées.

Enfin, l'une des découvertes les plus intéressantes du spectro-imageur OMEGA est la détection de phyllosilicates (argiles). Si la présence de ces phyllosilicates était pressentie depuis longtemps, ils n'avaient jamais pu être mis en évidence de manière non ambiguë par les missions précédentes. Or, les spectres OMEGA montrent de manière très nette la présence de bandes d'absorption étroites à 1,4 µm, 1,9 µm et 2,3 µm sur des affleurements très localisés (Poulet *et al.*, 2005, Loizeau *et al.*, 2007). On en voit un exemple sur le spectre 4 de la **figure 3**, correspondant à un affleurement de la région de Nili Fossae. La présence d'argiles, identifiées pour l'instant dans les régions les plus anciennes, apporte des contraintes fortes sur le passé climatique de cette planète. Ils témoignent d'une époque initiale où le climat de Mars était probablement plus chaud, avec une atmosphère plus dense permettant la présence d'eau liquide stable en surface. Les sulfates seraient la signature laissée par un changement climatique global, induit par une activité volcanique très intense ayant démarré 500 millions d'années à 1 milliard d'années après la formation de la planète, à l'origine du soulèvement du dôme

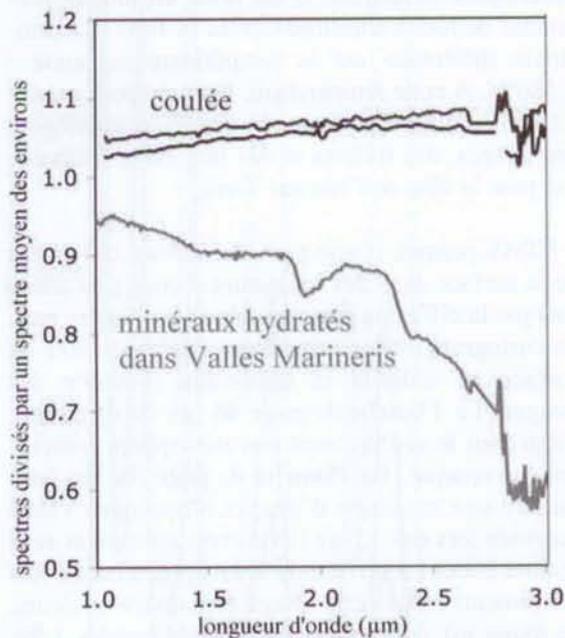
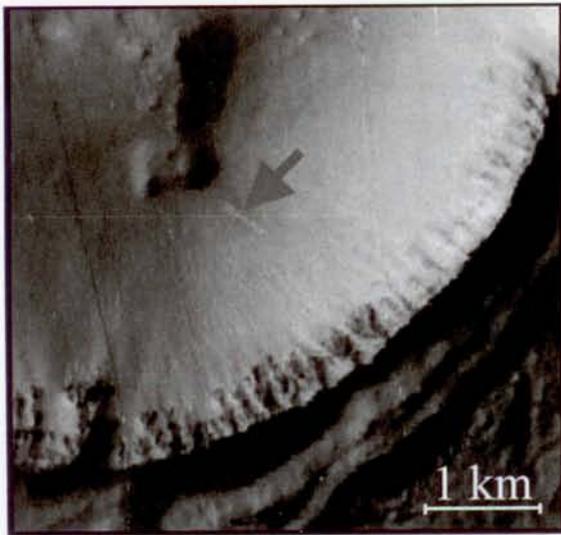
de Tharsis et de ses volcans géants (tels qu'Olympus Mons, faisant 25 km de haut). La quasi absence de minéraux hydratés dans les terrains récents et la persistance des signatures des minéraux mafiques (peu ou pas altérés) dans les terrains anciens de l'hémisphère sud indiqueraient que l'eau liquide sous forme stable a ensuite disparu de la surface de cette planète (Bibring *et al.*, 2006).

La mission nominale de deux ans, qui devait initialement durer jusqu'en 2006, a été étendue au moins jusqu'en 2008. Mis à part quelques pixels défectueux (pixels morts ou pixels chauds, dégradés au cours de la mission par des rayons cosmiques), OMEGA est donc toujours en état de marche actuellement. Cela permet des observations conjointes avec le spectromètre imageur CRISM à bord de la sonde américaine Mars Reconnaissance Orbiter (MRO), dont les opérations ont commencé en novembre 2006.

### 3-2. Apport de la sonde Mars Reconnaissance Orbiter

La sonde américaine Mars Reconnaissance Orbiter s'est mise en orbite martienne en 2005. Après presque une année pour circulariser l'orbite à l'aide du frottement dans la haute atmosphère, la sonde a commencé la phase scientifique de cartographie systématique de Mars en novembre 2006. C'est à ce jour la mission la plus complète en terme de capacité d'imagerie. Elle dispose en effet de trois caméras permettant d'observer la même zone avec des résolutions spatiales et spectrales différentes. La caméra CTX (Context imager) donne le contexte d'un site particulier, avec une résolution spatiale de 6 m/pixel sur une fauchée de 30 km. Au sein de cette image, la caméra HiRISE permet d'observer une zone de 6 km de large avec une résolution spatiale de 0,3 m/pixel. Enfin, le spectromètre imageur CRISM (Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars) fournit un cube hyperspectral de 544 canaux spectraux de 0,37 à 3,94 µm, avec une résolution spatiale moyenne de 20 m/pixel, sur une zone de 9 à 12 km de large (Murchie *et al.*, 2004). En plus du mode de pointage d'une cible particulière (près de 6 000 cibles prévues pendant la mission nominale, voir l'exemple de la **Figure 2**), CRISM possède la capacité de réaliser une cartographie complète de la planète en mode multispectral dans 70 canaux spectraux, avec cette fois une résolution spatiale de 100 à 200 m/pixel. Cette particularité en fait un instrument particulièrement innovant, le mode multispectral permettant de détecter les sites d'intérêt pouvant faire ensuite l'objet d'une observation détaillée en mode cible.

Si OMEGA a permis de détecter les principales hétérogénéités minéralogiques, et fourni d'ailleurs un point de comparaison important pour l'étalon-



**Figure 2 :** Exemple de cube hyperspectral CRISM/MRO pris en Janvier 2007. La résolution spatiale de 20m permet d'identifier précisément une coulée récente (apparue depuis 1999 dans un cratère à 38,4°S, 96.8°E), et dont le spectre montre l'absence de signature d'hydratation (d'après [http://crism.jhuapl.edu/gallery/featuredImage/pics/20070922\\_RT00003D3B\\_07.PNG](http://crism.jhuapl.edu/gallery/featuredImage/pics/20070922_RT00003D3B_07.PNG))

nage des spectres de CRISM, ce dernier permet d'observer une zone donnée avec une résolution spatiale presque 15 fois meilleure qu'OMEGA. L'instrument n'est pas plus performant en termes de rapport signal sur bruit, mais il peut en revanche détecter des zones plus « pures », dans lesquelles les signatures spectrales sont donc plus marquées qu'avec OMEGA. C'est particulièrement le cas au niveau des affleurements rocheux, dans les remparts des cratères, au niveau de leurs pics centraux, ou encore dans les zones de dépôts stratifiés. Ainsi, l'analyse des premières données CRISM révèle une diversité encore plus grande, avec la possibilité de clairement discriminer les

minéraux au sein d'une même famille, tels que les argiles (Murchie *et al.*, 2007, Milliken *et al.*, 2007). Les deux instruments sont donc très complémentaires. De leurs résultats dépendra probablement très fortement le choix des futurs sites d'atterrissage pour les prochains robots martiens tels que le rover américain « Mars Science Laboratory », prévu pour 2009, ou bien le rover européen ExoMars, prévu pour 2013. Il serait en effet extrêmement intéressant, si les contraintes techniques le permettent, d'atterrir dans une zone donnant par exemple accès aux argiles, afin de les étudier directement sur place avec une batterie d'instrument d'analyse (microscopes, spectromètres infrarouge ou à diffraction X, Mössbauer, ...).

#### 4. L'EXPLORATION DE TITAN ET DU SYSTÈME DE SATURNE PAR LA SONDE CASSINI HUYGENS

Depuis son arrivée en juillet 2004, et après sept ans de voyage, la mission Cassini-Huygens nous révèle progressivement la diversité du monde de Saturne, de ses anneaux et de ses satellites. Le module européen Huygens s'est détaché de la sonde Cassini le 25 décembre 2004 et a plongé dans l'atmosphère de Titan, le plus gros satellite de Saturne. Pendant la descente de plus de deux heures et demi sous son parachute, le module Huygens a enregistré des images montrant la présence de réseaux fluviaux asséchés, puis il s'est posé à la surface de Titan, à l'embouchure de l'un de ces réseaux (Tomasko *et al.*, 2005). Il a fonctionné pendant près de 40 minutes à la surface, avant d'être à court d'énergie. Cette expérience sans précédent a notamment permis d'enregistrer des spectres (ponctuels) de la surface de Titan dans la gamme 0,35 – 1,7  $\mu\text{m}$ , ainsi que des spectres pris à travers les différentes couches de l'atmosphère.

Depuis octobre 2004, la sonde CASSINI survole régulièrement les principaux satellites de Saturne, avec notamment à son bord un radar à synthèse d'ouverture, une caméra multispectrale visible (ISS), ainsi que l'imageur hyperspectral VIMS (Brown *et al.*, 2004). VIMS (*Visual and Infrared Mapping Spectrometer*) permet d'acquérir des images de 64x64 pixels, avec un spectre de 352 canaux enregistré pour chaque pixel entre 0,3 et 5,2  $\mu\text{m}$ , et un champ de vue de 0,5 mrad (soit une résolution de 500 m/pixel lorsque la sonde passe au plus proche de Titan). L'observation des anneaux et des principaux satellites de saturne (Titan mis à part) montre que ces corps sont majoritairement composés de glace d'eau, que l'on identifie aisément à partir de la présence des bandes à 1,5 et 2,0  $\mu\text{m}$ . La **Planche 3, page 45** montre un exemple assez spectaculaire d'image enregistrée par VIMS en février 2005 (cube CM\_1489037199\_1), où l'on voit le satellite Encelade passer devant Saturne, les

anneaux étant vus par la tranche. Les spectres extraits des anneaux de Saturne et d'Encelade correspondent à des spectres de glace d'eau quasiment pure (voir l'analogie avec la **Figure 1**). On voit également un pic de réflectance à 3,1  $\mu\text{m}$ , ce qui indique la présence de glace cristalline dans les anneaux (constitués de blocs de glace s'entrechoquant régulièrement). Ce pic n'est pas présent sur le spectre d'Encelade, dont la surface est plus altérée par les impacts de micrométéorites et les particules du vent solaire.

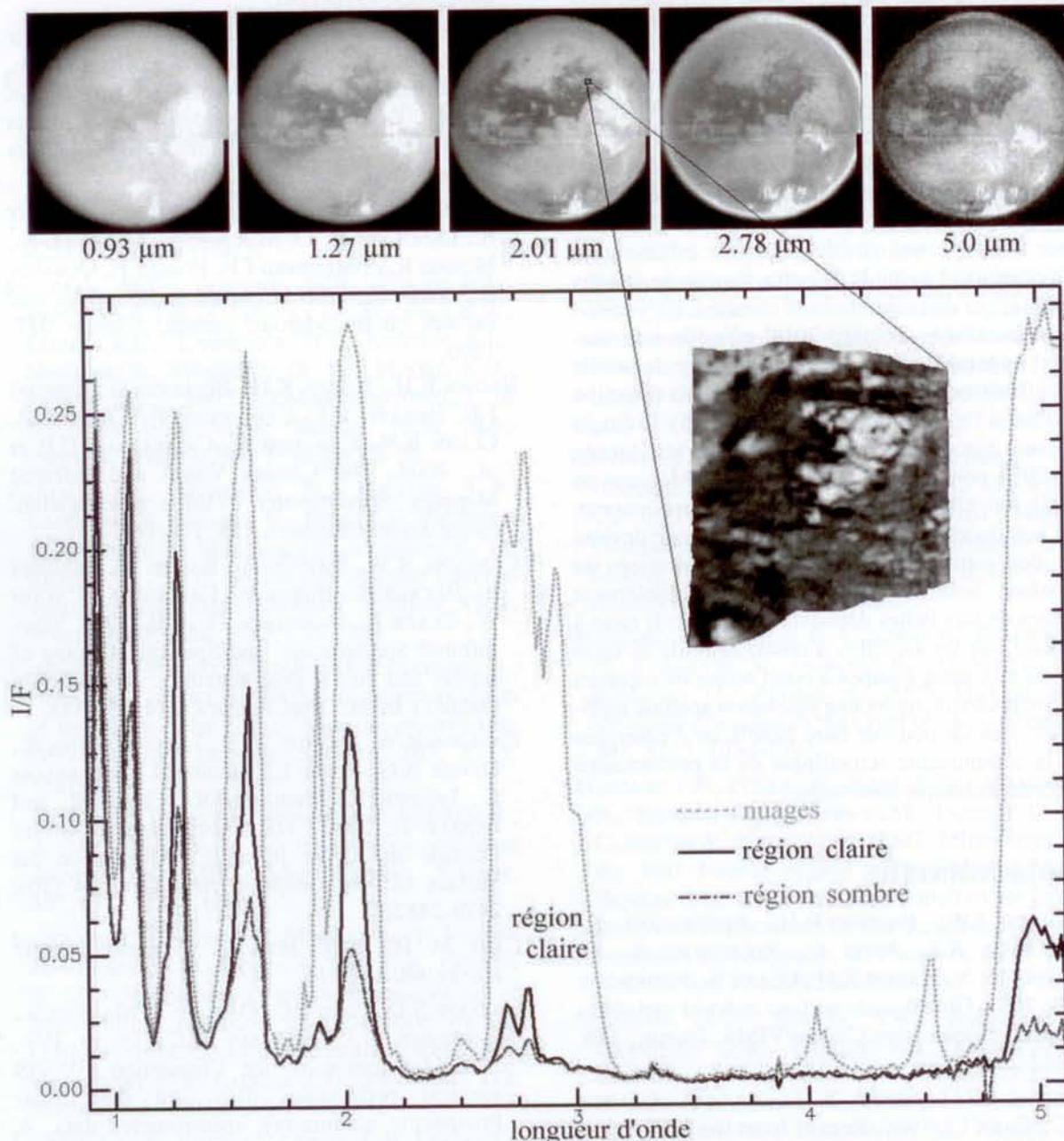
Le plus grand satellite de Saturne, Titan, est une cible d'intérêt scientifique majeur. En effet, Titan est entouré d'une épaisse atmosphère composée majoritairement d'azote (95 %) et de méthane (~ 5 %). Des molécules organiques complexes ont été détectées dans sa haute atmosphère (Niemann, 2005). L'absorption et la diffusion par les aérosols, ainsi que l'absorption des gaz atmosphériques, rend cette atmosphère complètement opaque dans le domaine visible. En revanche, les premières observations réalisées par le spectro-imageur VIMS ont montré que la surface pouvait être observée dans 7 fenêtres étroites de l'infrarouge, où le méthane n'absorbe pas (Sotin *et al.*, 2005). La **Figure 3** montre la surface de Titan dans différentes fenêtres, ainsi que trois spectres typiques des régions claires, des régions sombres et des nuages. On voit que la diffusion, un effet qui brouille les images, est d'autant plus gênante que la longueur d'onde est courte. La meilleure fenêtre spectrale en termes de rapport signal sur bruit est la fenêtre à 2  $\mu\text{m}$ , dans laquelle la diffusion est relativement faible et le signal réfléchi par la surface suffisamment fort. Le zoom montre une structure qui a été interprétée comme un cryovolcan où le méthane, déstabilisé en subsurface, serait relâché dans l'atmosphère (Sotin *et al.*, 2005). On voit aussi que les spectres de Titan, bien que fortement affectés par l'absorption de l'atmosphère, ne semblent pas compatibles avec une surface dominée par de la glace d'eau pure, dont le spectre décroît fortement entre 2,65 et 2,78  $\mu\text{m}$ . C'est le contraire qui est généralement observé sur Titan, avec une réflectance plus forte à 2,78  $\mu\text{m}$  qu'à 2,65  $\mu\text{m}$ . Cela implique soit la présence d'un autre constituant, ou bien de mélanges, ou encore l'existence d'une couche superficielle.

Au cours des quatre années de la mission nominale de Cassini (entre juillet 2004 et mai 2008), Titan sera survolé 44 fois. 26 survols supplémentaires seront effectués lors de la mission étendue, entre juillet 2008 et juin 2010. Chaque survol permet de cartographier une petite partie de la surface de Titan, la cartographie globale du satellite étant actuellement en cours (Barnes *et al.*, 2007). 20 % de la surface sera cartographiée par le radar à synthèse d'ouverture lors de la mission nominale, cette couverture atteignant 35 à 40 % fin 2010. La réso-

lution spatiale maximale des observations VIMS de Titan est de 500 mètres par pixel. En pratique, du fait de la nécessité de partager le temps d'observation entre les différents instruments lors de chaque survol, seule une très faible fraction de la surface sera cartographiée par VIMS avec une résolution spatiale meilleure que 5 km par pixels, ce qui est un seuil critique pour identifier des morphologies particulières pouvant être interprétées en termes de processus géologiques.

Les premières données acquises par les instruments à bord de Cassini ont révélé la présence de nuages, de fleuves, de mers, de montagnes, de champs de dunes (impliquant des vents, par analogie avec les morphologies observées dans les zones désertiques terrestres). C'est donc un monde présentant de fortes similitudes avec la Terre. La principale différence est la température moyenne : -180°C. A cette température, l'eau ne peut exister à l'état liquide. Sur Titan, la molécule à l'origine des nuages, des rivières et des lacs est le méthane, qui joue le rôle de l'eau sur Terre.

VIMS permet, d'une part, de réaliser des cartes de la surface dans des longueurs d'onde peu affectées par la diffusion atmosphérique, et, d'autre part, de cartographier les principales hétérogénéités de surface en utilisant la dimension spectrale des images. La **Planche 4, page 46** (en haut) montre Titan dans le visible, avec son atmosphère complètement opaque. La **Planche 4, page 46** (en bas) montre une mosaïque d'images infrarouges VIMS acquises lors des 13<sup>e</sup> et 17<sup>e</sup> survols en avril et septembre 2006. La surface de Titan apparaît cette fois clairement. Dans cette image en fausses couleurs, le rouge est codé par le rapport de bandes 1,59/1,27  $\mu\text{m}$ , le vert par le rapport 2,03/1,27  $\mu\text{m}$  et le bleu par le rapport 1,27/1,08  $\mu\text{m}$ . Ces canaux sont choisis pour mettre en évidence des variations de composition, telles que la présence éventuelle de glace d'eau ou de CO<sub>2</sub> par exemple. On voit que différentes unités apparaissent distinctement. La zone marron correspond à des champs de dunes. Les zones bleu foncé sont des terrains peut-être enrichis en glace d'eau par rapport aux environs (Rodríguez *et al.*, 2006). Si la cartographie des principales hétérogénéités est possible, l'identification de la composition absolue des matériaux de surface est rendue extrêmement difficile du fait de la très forte absorption et diffusion de l'atmosphère. L'observation à haute résolution du site d'atterrissage du module Huygens, pour lequel on dispose de la vérité terrain (un spectre de la surface entre 0,35 et 1,7  $\mu\text{m}$ ), sera réalisée pour la première fois en novembre 2008. Elle devrait permettre d'affiner les modèles de correction atmosphériques basés sur le transfert radiatif, et ainsi de mieux discriminer dans les données la contribution de l'atmosphère de celle de la surface.



**Figure 3 :** Spectres caractéristiques des régions claires, sombres, et des nuages sur Titan, enregistrés par le spectro-imageur VIMS de la sonde CASSINI. L'encart montre l'une des meilleures images acquises par VIMS en octobre 2004 (résolution 1,7 km/pixels, la structure circulaire faisant ~ 30 km de diamètre).

## 5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les spectromètres imageurs en orbite autour de Mars font actuellement considérablement progresser notre connaissance de cette planète, grâce à la découverte de minéraux traceurs de l'histoire géologique et climatique de cette planète (olivines, pyroxènes, sulfates, oxydes de fer, argiles). De même, le spectro-imageur VIMS à bord de la sonde CASSINI nous révèle progressivement la diversité des processus à l'œuvre sur Titan, qui est parfois considéré comme une Terre primitive congelée.

Depuis 2004, l'imagerie hyperspectrale est donc très présente dans l'exploration du système solaire avec notamment ces deux spectro-imageurs qui

sont actuellement en fonctionnement autour de Mars et un autre autour de Saturne. Mais c'est aussi vrai pour les autres corps du Système Solaire. La sonde européenne Venus Express, en orbite autour de Vénus depuis mai 2006, dispose également d'un imageur hyperspectral (VIRTIS) couvrant la gamme 0,3 – 5,2 μm dans 352 canaux spectraux. Cet instrument est principalement dédié à l'étude de l'atmosphère de Vénus, qui est extrêmement dense (90 fois la densité de l'atmosphère terrestre) et quasiment opaque dans le domaine visible-proche infrarouge. Un seul canal spectral à 1,02 μm permet de voir la surface à travers l'atmosphère, mais la très forte diffusion par les aérosols limite la résolution spatiale à 50-100 km par pixels.

La sonde indienne Chandrayaan 1, dont le lancement vers la Lune est prévu pour avril 2008, sera aussi équipée d'un imageur hyperspectral (M3, *Moon Mineralogy Mapper*) travaillant dans le domaine 0,43-3,0  $\mu\text{m}$ , avec 261 canaux spectraux (soit une résolution spectrale de 10 nm) et une résolution spatiale de 70 m/pixels. La sonde Dawn, lancée avec succès le 28 septembre 2007 en direction des astéroïdes Vesta (arrivée en 2011) et Cérès (arrivée en 2015), est également équipée d'un imageur hyperspectral visible et proche infrarouge à 400 canaux. La sonde Rosetta, lancée le 2 mars 2004, et qui doit rencontrer la comète Churyumov-Gerasimenko en octobre 2014, possède son imageur hyperspectral. Même chose pour la sonde New Horizon, lancée en janvier 2006 en direction de Pluton (arrivée prévue en juillet 2015). Enfin, la mission européenne BepiColombo qui sera lancée en 2013 pour une arrivée autour de Mercure en 2020, sera elle aussi équipée d'un spectro-imageur. On voit donc que l'imagerie hyperspectrale devient un des outils privilégiés de l'exploration du Système Solaire, avec très vraisemblablement encore de très belles découvertes à venir. Il reste à espérer que les satellites d'observation de la Terre seront eux aussi équipés à court terme de capteurs hyperspectraux, ayant une résolution spatiale suffisante, afin de pouvoir faire bénéficier l'ensemble de la communauté scientifique de la performance de cette technique innovante.

## BIBLIOGRAPHIE

- BARNES J.W., BROWN R.H., SODERBLUM L., BURATTI B.J., SOTIN C., RODRIGUEZ S., LE MOUÉLIC S., BAINES K.H., CLARK R., NICHOLSON P., 2007. Global-scale surface spectral variations on Titan seen from Cassini/VIMS. *Icarus*, **186**, 242-258.
- BIBRING J.-P., LANGEVIN Y., SOUFFLOT A., COMBES C., CARA C., 1989. Results from the ISM experiment, *Nature*, **341**, 591-593.
- BIBRING J.-P., SOUFFLOT A., BERTHÉ M., LANGEVIN Y., GONDET B., DROSSART P., BOUYÉ M., COMBES M., PUGET P., SEMERY A., BELLUCCI G., FORMISANO V., MOROZ V., KOTTSOV V., AND THE OMEGA CO-I TEAM, 2004a. *Eur. Space Agency Spec. Pub.*, **1240**, 37.
- BIBRING J.-P., LANGEVIN Y., POULET F., GENDRIN A., GONDET B., BERTHÉ M., SOUFFLOT A., DROSSART P., COMBES M., BELLUCCI G., MOROZ V., MANGOLD N., SCHMITT B., THE OMEGA TEAM, 2004b. Perennial water ice identified in the south polar cap of Mars, *Nature*, **428**, Issue 6983, 627-630.
- BIBRING J.-P., LANGEVIN Y., GENDRIN A., GONDET B., POULET F., BERTHÉ M., SOUFFLOT A., ARVIDSON R., MANGOLD N., MUSTARD J. F., DROSSART P., THE OMEGA TEAM, 2005. Mars Surface Diversity as Revealed by the OMEGA/Mars Express Observations, *Science*, **307**, 5715, 1576-1581.
- BIBRING J.-P., LANGEVIN Y., MUSTARD J.F., POULET F., ARVIDSON R., GENDRIN A., GONDET B., MANGOLD N., PINET P., FORGET F., THE OMEGA TEAM, 2006. Global Mineralogical and Aqueous Mars History Derived from OMEGA/Mars Express Data, *Science*, **312**, 400-404.
- BIBRING J.-P., ARVIDSON R.E., GENDRIN A., GONDET B., LANGEVIN Y., LE MOUÉLIC S., MANGOLD N., MORRIS R.V., MUSTARD J.F., POULET F., QUANTIN C., SOTIN C., 2007. Coupled ferric oxides and sulfates on the Martian surface, *Science*, **317**, 1206.
- BROWN R.H., BAINES K.H., BELLUCCI G., BIBRING J.-P., BURATTI B.J., CAPACCIONI F., CERRONI P., CLARK R.N., CORADINI A., CRUIKSHANK D.P. *et al.*, 2004. The Cassini Visual and Infrared Mapping Spectrometer (VIMS) investigation, *Space Science Reviews*, **115**, 111-168.
- CARLSON, R.W., SMYTHE W., BAINES K., BARBINIS E., BECKER K., BURNS R., CALCUTT S., CALVIN W., CLARK R., DANIELSON G. *et al.*, 1996. Near-Infrared Spectroscopy and Spectral Mapping of Jupiter and the Galilean Satellites: Results from Galileo's Initial Orbit, *Science*, **274**, 385-388.
- CARLSON R.W., SMYTHE W. D., LOPES-GAUTIER R., DAVIES A.G., KAMP L., MOSHER J., SODERBLUM L., LEADER F., MEHLMAN R., CLARK R. and FANALE F., 1997. The Distribution of Sulfur Dioxide and Other Infrared Absorbers on the Surface of Io», *Geophys. Res. Lett.*, **24** (20), 2479-2482.
- CARR M. H., 1986. Mars: A water-rich planet? *Icarus*, **68**, 187-216.
- CHEVREL S.D., PINET P.C., DAYDOU Y., MAURICE S., LAWRENCE D.J., FELDMAN W.C., LUCEY P.G., 2002. Integration of the Clementine UV-VIS spectral reflectance data and the Lunar Prospector gamma-ray spectrometer data: A global-scale multi-element analysis of the lunar surface using iron, titanium, and thorium abundances, *J. Geophys. Research*, **107**, E12, pp. 15-1.
- CHRISTENSEN P.R., BANDFIELD J.L., HAMILTON V.E., RUFF S.W., KIEFFER H.H., TITUS T.N., MALIN M.C., MORRIS R.V., LANE M.D., CLARK R.L. *et al.*, 2001. Mars Global Surveyor Thermal Emission Spectrometer experiment: Investigation description and surface science results, *Journal of Geophysical Research*, **106**, E10, 23823-23871.
- CLARK R.N., ROUSH T.L., 1984. Reflectance Spectroscopy: Quantitative Analysis Techniques for Remote Sensing Applications, *Journal of Geophysical Research*, **89**, no. B7, 6329-6340.
- ELPHIC, R.C., LAWRENCE D.J., FELDMAN W.C., BARRACLOUGH B.L., MAURICE S., BINDER A.B., LUCEY P.G., 1998. Lunar Fe and Ti Abundances:

- Comparison of Lunar Prospector and Clementine Data, *Science*, **281**, 5382, p1493.
- ÉRARD S., BIBRING J-P., FORNI O., MUSTARD J., HEAD J.W., 1991. Spatial variations in composition of the Valles Marineris and Isidis Planitia regions of Mars derived from ISM data, *Lunar and Planetary Science Conference, 21st*, Houston, TX, Mar. 12-16, Proceedings (A91-42332 17-91), 437-455.
- FELDMAN, W.C., BOYNTON W.V., TOKAR R.L., PRETTYMAN T.H., GASNAULT O., SQUYRES S.W., ELPHIC R.C., LAWRENCE D.J., LAWSON S.L., MAURICE S., MCKINNEY G. W., MOORE K.R., REEDY R.C., 2002. Global Distribution of Neutrons from Mars: Results from Mars Odyssey, *Science*, **297**, 5578, pp 75-78.
- GENDRIN A., MANGOLD N., BIBRING J.-P., LANGEVIN Y., GONDET B., POULET F., BONELLO G., QUANTIN C., MUSTARD J.F., ARVIDSON R., LE MOUÉLIC S., 2005. Sulfates in Martian Layered Terrains: The OMEGA/Mars Express View, *Science*, **307**, Issue 5715, 1587-159.
- LANGEVIN Y., POULET F., BIBRING J.-P., SCHMITT B., DOUTÉ S., GONDET B., 2005a. Summer evolution of the North Polar Cap of Mars as observed by OMEGA/Mars Express, *Science*, **307**, 5715, 1581-1584.
- LANGEVIN Y., POULET F., BIBRING J.-P., GONDET B., 2005b. Sulfates in the North polar region of Mars detected by OMEGA/Mars Express, *Science*, **307**, 5715, 1584-1586.
- LANGEVIN, Y., BIBRING J.-P., MONTMESSIN F., FORGET F., VINCENDON M., DOUTÉ S., POULET F., GONDET B., 200. Observations of the south seasonal cap of Mars during recession in 2004–2006 by the OMEGA visible/near-infrared imaging spectrometer on board Mars Express, *J. Geophys. Res.*, **112**, E08S12, doi:10.1029/2006JE002841
- LE MOUÉLIC S., SOTIN C., COMBE J.-P., LEDEIT L., GENDRIN A., MUSTARD, J., BIBRING J. P., PINET P., 2006. Composition of the dust on Mars derived from OMEGA hyperspectral images, *Lunar Planet. Sci. Conf. XXXVII*, Houston, 13-17 mars, abstract#1409.
- LOIZEAU D., MANGOLD N., POULET F., BIBRING J.-P., GENDRIN A., ANSAN V., GOMEZ C., GONDET B., LANGEVIN Y., MASSON P., NEUKUM G., 2007. Phyllosilicates in the Mawrth Vallis region of Mars, *J. Geophys. Res.*, **112**, E08S08, doi:10.1029/2006JE002877
- MCCORD, T.B., HANSEN G.B., FANALE F.P., CARLSON R.W., MATSON D.L., JOHNSON T.V., SMYTHE W.D., CROWLEY J.K., MARTEN P.D., OCAMPO A.C., HIBBITS C., GRANAHAN J.C., 1998. Salts on Europa's Surface, *Science*, **280**, 1242-5.
- MILLIKEN, R.E., GROTZINGER, J., MURCHIE, S., GRANT, J. A., CRISM TEAM, 2007, Evidence for Hydrated Phyllosilicates in Holden Crater, Mars Using Hyperspectral CRISM Data. *38th Lunar and Planetary Science Conference*, March 12-16, League City, Texas. LPI Contribution No. 1338, p.1913
- MURCHIE, S. AND THE CRISM SCIENCE AND ENGINEERING TEAMS, 2004. Crism (Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars) on MRO (Mars Reconnaissance Orbiter), *Proceedings of the SPIE*, **5660**, pp. 66-77
- MURCHIE, S. AND THE CRISM SCIENCE AND ENGINEERING TEAMS, 2007. First Results from the Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars (CRISM), *38th Lunar and Planetary Science Conference*, March 12-16, League City, Texas. LPI Contribution No. 1338, p.1472
- MUSTARD J.F., ÉRARD S., BIBRING J-P., HEAD J. W., HURTREZ S., LANGEVIN Y., PIETERS C. M., SOTIN C., 1993. The Surface of Syrtis Major: Composition of the Volcanic Substrate and Mixing With Altered Dust and Soil, *J. Geophys. Research*, **98**, no. E2, 3387-3400.
- MUSTARD J.F., POULET F., GENDRIN A., BIBRING J-P., LANGEVIN Y., GONDET B., MANGOLD N., BELLUCCI G., ALTIERI F., 2005. Olivine and Pyroxene Diversity in the Crust of Mars, *Science*, **307**, 5715, 1594-1597.
- MUSTARD J.F., POULET F., HEAD J. W., MANGOLD N., BIBRING J-P., PELKEY S.M., FASSETT C. I., LANGEVIN Y., NEUKUM G., 2007. Mineralogy of the Nili Fossae region with OMEGA/Mars Express data: 1. Ancient impact melt in the Isidis Basin and implications for the transition from the Noachian to Hesperian, *J. Geophys. Res.*, **112**, E08S03, doi:10.1029/2006JE002834
- NIEMANN H.B., ATREYA S.K., BAUER S.J., CARIGNAN G.R., DEMICK J.E., FROST R.L., GAUTIER D., HABERMAN J.A., HARPOLD D.N., HUNTEN D.M., ISRAEL G., LUNINE J.I., KASPRZAK W.T., OWEN T.C., PAULKOVICH M., RAULIN F., RAAEN E., WAY S.H., 2005. The abundances of constituents of Titan's atmosphere from the GCMS instrument on the Huygens probe, *Nature*, **438**, Issue 7069, pp. 779-784.
- POULET, F. , BIBRING J-P., MUSTARD J.F., GENDRIN A., MANGOLD N., LANGEVIN Y., ARVIDSON R. E., GONDET B., GOMEZ C., THE OMEGA TEAM, 2005. Phyllosilicates on Mars and implications for early martian climate, *Nature*, **438**, doi:10.1038/nature04274
- RODRIGUEZ S., LE MOUÉLIC S., SOTIN C., CLÉNET H., CLARK R.N., BURATTI B., BROWN R.H., MCCORD T.B., NICHOLSON P.D., BAINES K.H. AND THE VIMS SCIENCE TEAM, 2006. Cassini/VIMS hyperspectral observations of the Huygens landing site on Titan, *Planet. Space Sci.*, **54**, 1510–1523.
- ROSENQVIST J., DROSSART P., COMBES M., ENCRENAZ T., LELLOUCH E., BIBRING J. P., ERARD S., LANGEVIN Y., CHASSEFIÈRE E., 1992. Minor

constituents in the Martian atmosphere from the ISM/Phobos experiment, *Icarus*, **98**, Issue 2, p. 254-270.

SOTIN C., JAUMANN R., BURATTI B. J., BROWN R.H., CLARK R.N., SODERBLOM L.A., BAINES K.H., BELLUCCI G., BIBRING J-P., CAPACCIONI F. *et al.*, 2005. Release of volatiles from a possible cryovolcano from near-infrared imaging of

Titan, *Nature*, **435**,786-789, doi:10.1038/nature 03596.

TOMASKO, M.G., ARCHINAL B., BECKER T., BÉZARD B., BUSHROE M., COMBES M., COOK D., COUSTENIS A., DE BERGH C., DAFOE L.E. *et al.*, 2005. Rain, winds and haze during the Huygens probe's descent to Titan's surface, *Nature*, **438**, issue 7069, 765-778.

# APPLICATIONS OF HYPERSPECTRAL IMAGERY TO THE STUDY OF PLANETARY BODIES : THE CASE OF MARS AND TITAN

S. LE MOUÉLIC<sup>1,2</sup>, C. SOTIN<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Université de Nantes, Laboratoire de Planétologie et Géodynamique, 2 rue de la Houssinière, 44322 Nantes Cedex 03, France.

<sup>2</sup>CNRS, UMR-6112, 2 rue de la Houssinière, 44322 Nantes Cedex 03, France.

<sup>3</sup>Jet Propulsion Laboratory, M/S 183-501, 4800 Oak Grove Drive, Pasadena, CA 91109, USA.

## ABSTRACT

The main objective of this paper is to illustrate the results acquired by the imaging spectrometers currently flying onboard Solar System probes. The aim of these experiments is to derive the composition of the surface (minerals and ices) of planetary bodies. The visible – near infrared domain contains very diagnostic absorption features, which can be used to investigate the composition of planetary bodies (Figure 1). A specific focus will be made on the exploration of Mars and Titan. On Mars, the OMEGA imaging spectrometer onboard Mars Express (which was inserted in Martian orbit in December 2003), and followed two years later by the CRISM experiment onboard Mars Reconnaissance Orbiter, has first permitted the direct identification of water in polar caps. OMEGA acquires images in 352 channels from 0.3 to 5.2  $\mu\text{m}$ , with a spatial resolution ranging from 300 to 4 km/pixels. Plate 1, page 43 shows an example of water ice and CO<sub>2</sub> ice mapping on the south polar cap of Mars. OMEGA has then revealed the distribution of the main minerals such as pyroxenes and olivines, but also sulfates, iron oxides, and overall phyllosilicates. Examples of spectra and distribution maps are given in Plate 2, page 44. These minerals provide strong constraints about the past geological and climatic conditions which were present on Mars. In particular, the presence of phyllosilicates in the most ancient terrains of Mars suggests that the early climate of Mars was probably warmer and wetter than nowadays. The identification of widespread sulfates signatures in outcrops suggests that a major change, probably triggered by a huge volcanic activity (at the origin of Tharsis dome and volcanoes), has occurred about 500 millions years or 1 billion years after the planet formation. The persistence of strong mafics signatures in old terrains of the southern hemisphere suggests that the water in its liquid form was already not stable after this phase, therefore perhaps during the last 3 billions years. The CRISM imaging spectrometer onboard Mars Reconnaissance Orbiter, which started its

systematic mapping operations in October 2006, has the capability to image a given  $\sim 10 \times 10$  km area with a pixel size of 20 m/pixels, in 544 spectral channels from 0.37 to 3.94  $\mu\text{m}$  (Figure 2). This provides a new opportunity to detect strong spectral signatures, with a spatial resolution 15 times better than OMEGA, and therefore giving access to “purer” pixels.

Farther on the Solar System, the VIMS imaging spectrometer onboard CASSINI spacecraft is progressively revealing the diversity of the Saturnian system. VIMS acquires 64x64 pixels images with a 352 channels spectrum between 0.3 and 5.2  $\mu\text{m}$  acquired for each pixels. Plate 3, page 45 gives an example of the detection of water ice signatures on Enceladus and Saturn's rings. The surface of Titan, the biggest satellite of Saturn, is veiled by a thick atmosphere of nitrogen and methane completely opaque at visible wavelengths. VIMS can still image the surface of Titan in seven narrow spectral windows in the infrared (Figure 3). If the determination of the absolute composition of the surface is very challenging, due to the strong absorption by the atmospheric methane, the mapping of the surface heterogeneities is made possible by combining the spectral windows (Plate 4, page 46).

Several other Solar System probes already launched are equipped with visible and infrared imaging spectrometers (Venus Express currently in Venus orbit, Rosetta for comet Churyumov-Gerasimenko, Dawn for asteroids Vesta and Ceres, New Horizon for Pluto), so as forthcoming missions (Chandrayaan I for the Moon, Bepi Colombo for Mercury). It could be very interesting to have similar visible and infrared imaging spectrometers available in Earth observing satellites.

## KEY WORDS

Remote sensing, Infrared, Hyperspectral, Planets, Mars, Titan.

## BIBLIOGRAPHY

See French text.

## LIST OF FIGURES AND PLATES

**Figure 1:** Example of spectra of ices ( $\text{CO}_2$  and  $\text{H}_2\text{O}$ ) and minerals constituting the planetary surfaces. The reflectance spectra are taken from the speclib05 USGS library and from the CRISM ([http://pds-geosciences.wustl.edu/missions/mro/spectral\\_library.htm](http://pds-geosciences.wustl.edu/missions/mro/spectral_library.htm)) library, except for  $\text{CO}_2$  which comes from OMEGA data.

**Figure 2:** Example of CRISM/MRO hyperspectral cube acquired in January 2007. The spatial resolution of 20m/pixel allows the detection of a recent gully which appeared since 1999 in a crater (38,4°S, 96.8°E). The spectrum shows no hydration feature. (adapted from [http://crism.jhuapl.edu/gallery/featuredImage/pics/20070922\\_FRT00003D3B\\_07.PNG](http://crism.jhuapl.edu/gallery/featuredImage/pics/20070922_FRT00003D3B_07.PNG))

**Figure 3 :** Spectra representative of bright regions, dark regions and clouds on Titan, acquired by the VIMS imaging spectrometer onboard Cassini spacecraft. The inset shows one of the best images taken by VIMS in October 2004 with a resolution of 1.7 km/pixels. This feature has been interpreted as a cryovolcano (Sotin et al., 2005).

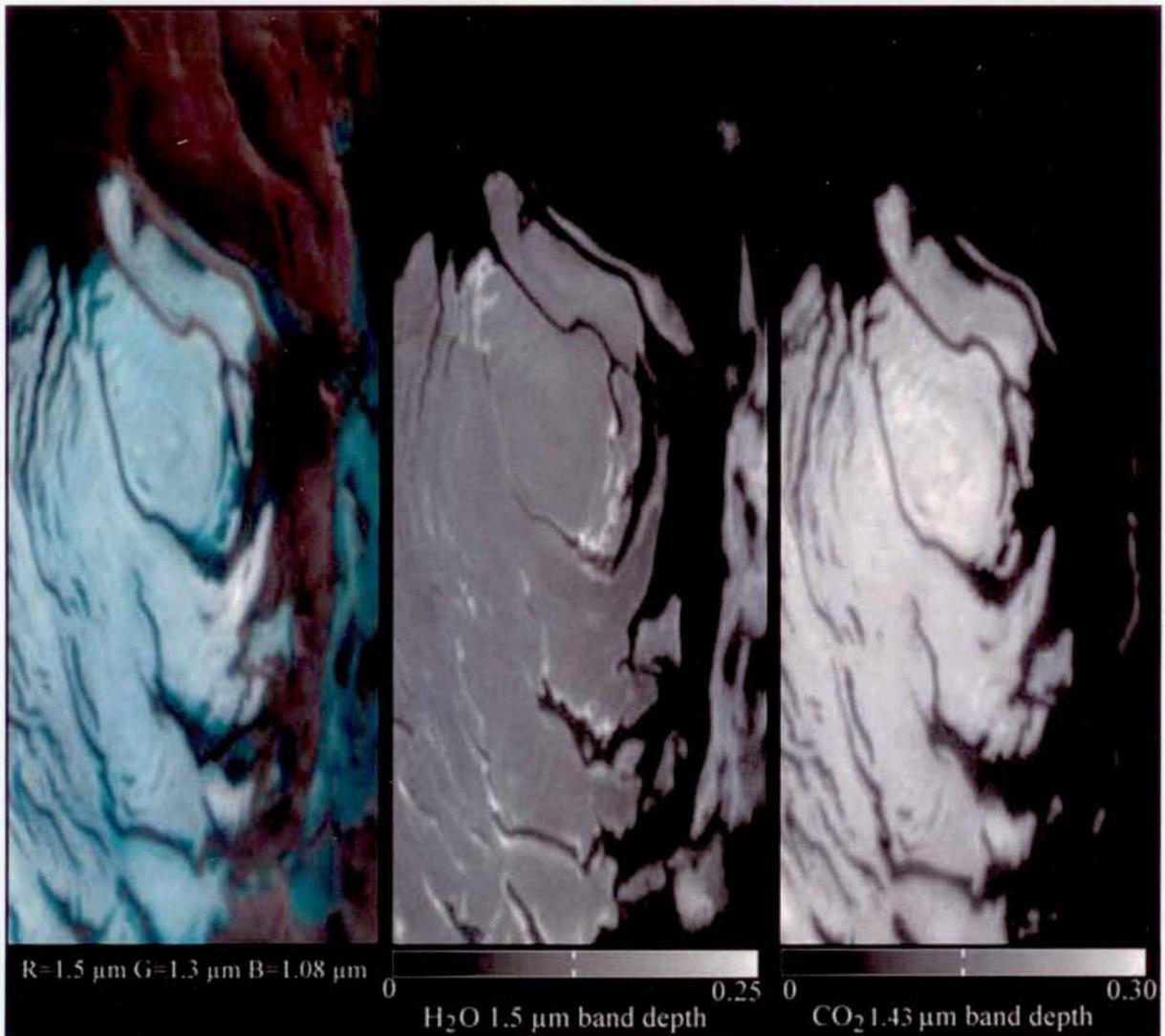
**Plate 1:** South polar cap of Mars seen by the OMEGA imaging spectrometer onboard Mars Express (orbit 41). Left : false color composite showing the different units (R=1.5  $\mu\text{m}$ , G= 1.3  $\mu\text{m}$ , B= 1.08  $\mu\text{m}$ ). Middle: 1.5  $\mu\text{m}$  band depth showing water ice (bright areas) on the edge of the polar

cap. Right: 1.44  $\mu\text{m}$  band depth showing the  $\text{CO}_2$  ice cover.

**Plate 2:** (a) Examples of Mars spectra taken by the OMEGA imaging spectrometer onboard Mars Express. (b) same spectra offset for clarity. (c) false color composite of Syrtis Major area (orbit 422\_4). The bright red indicates olivine, blue corresponds to clinopyroxene and cyan to a mixture of orthopyroxene and clinopyroxene. (d) gypsum deposits at the border of the North polar cap. The 1.92  $\mu\text{m}$  band depth is shown between 0 (dark blue) and 22% (red), overlaying a false color composite of the cap (R=1.5  $\mu\text{m}$ , G=1.3  $\mu\text{m}$ , B=1.08  $\mu\text{m}$ ) where water ice appears in cyan. (e) iron oxides deposits in Aram Chaos (R=1.32  $\mu\text{m}$ , G=1.11  $\mu\text{m}$ , B=0.97  $\mu\text{m}$ ). (f) global maps of clinopyroxenes and orthopyroxenes distribution derived from a linear unmixing analysis. Spectra 1, 2, 3 et 4 are extracted from orbit 422\_4. Spectrum 5 from orbit 401\_3 and spectrum 6 from orbit 902\_1.

**Plate 3:** False color image of Enceladus and Saturn rings (Saturn is in the background), taken by the VIMS imaging spectrometer onboard Cassini. Deep absorption bands at 1.5 and 2.0  $\mu\text{m}$  indicates the presence of water ice. A peak at 3.1  $\mu\text{m}$  in the spectrum of the rings indicates that the corresponding ice is crystalline.

**Plate 4:** up: Titan in the visible, as it would be seen by naked eyes. Bottom: Titan seen in false colors by the VIMS imaging spectrometer (Red=1.59/1.27  $\mu\text{m}$ , Green=2.03/1.27  $\mu\text{m}$ , Blue=1.27/1.08  $\mu\text{m}$ ). Data acquired during the 13<sup>th</sup> and 17<sup>th</sup> flybys in April and September 2006.



*Planche 1 : Calotte polaire sud de Mars vue par le spectro-imageur OMEGA de Mars Express (orbite 41). L'image de gauche en fausses couleurs ( $R = 1,5 \mu\text{m}$ ,  $G = 1,3 \mu\text{m}$ ,  $B = 1,08 \mu\text{m}$ ) montre les différentes unités. L'image du milieu (profondeur de bande à  $1,5 \mu\text{m}$ ) indique la présence de glace d'eau (zones blanches) en périphérie de la calotte. L'image de droite (profondeur de bande à  $1,43 \mu\text{m}$ ) indique la présence d'une importante couverture de  $\text{CO}_2$ .*

*Plate 1: South polar cap of Mars seen by the OMEGA imaging spectrometer onboard Mars Express (orbit 41). Left: false color composite showing the different units ( $R = 1.5 \mu\text{m}$ ,  $G = 1.3 \mu\text{m}$ ,  $B = 1.08 \mu\text{m}$ ). Middle:  $1.5 \mu\text{m}$  band depth showing water ice (bright areas) on the edge of the polar cap. Right:  $1.44 \mu\text{m}$  band depth showing the  $\text{CO}_2$  ice cover.*

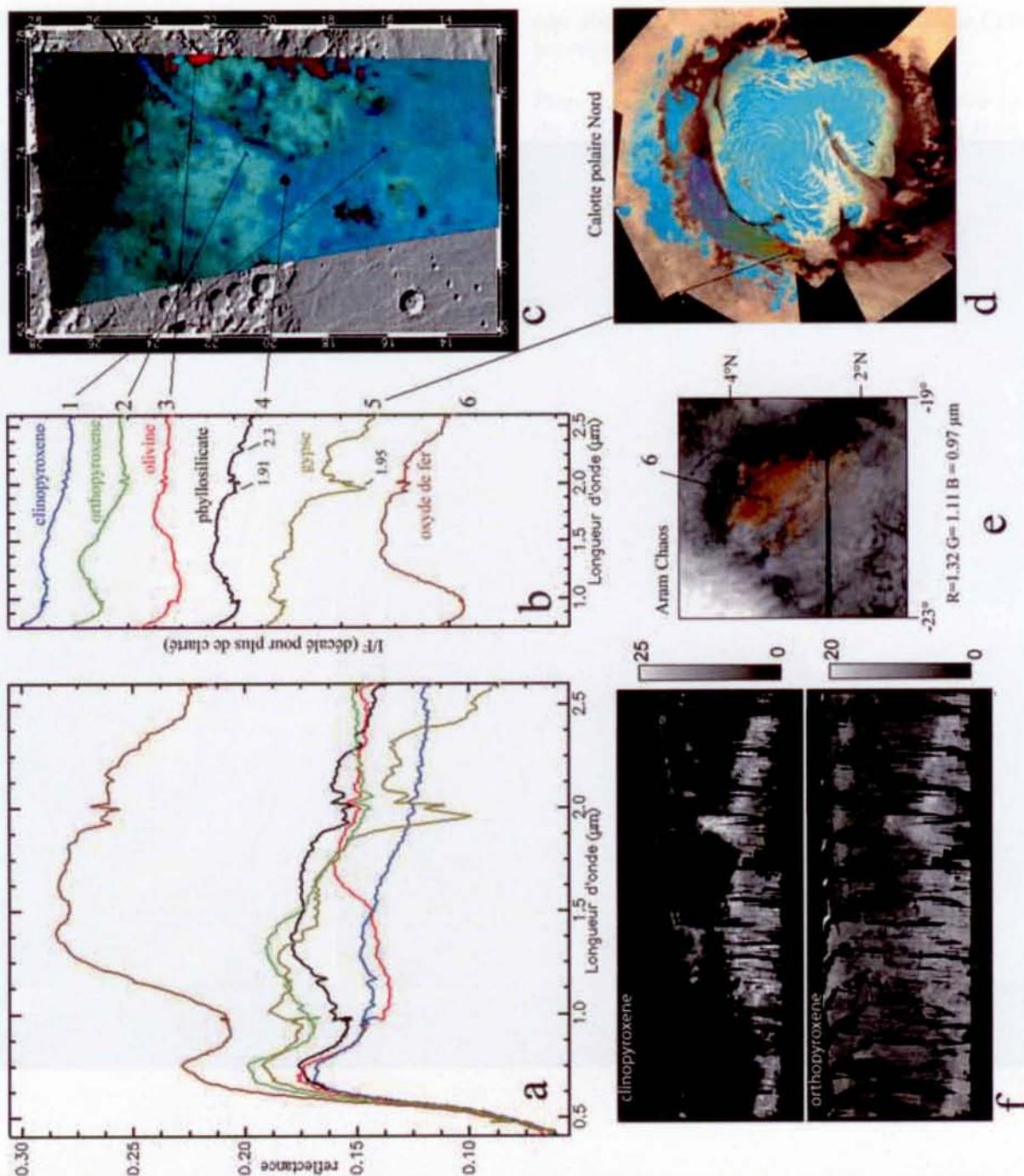
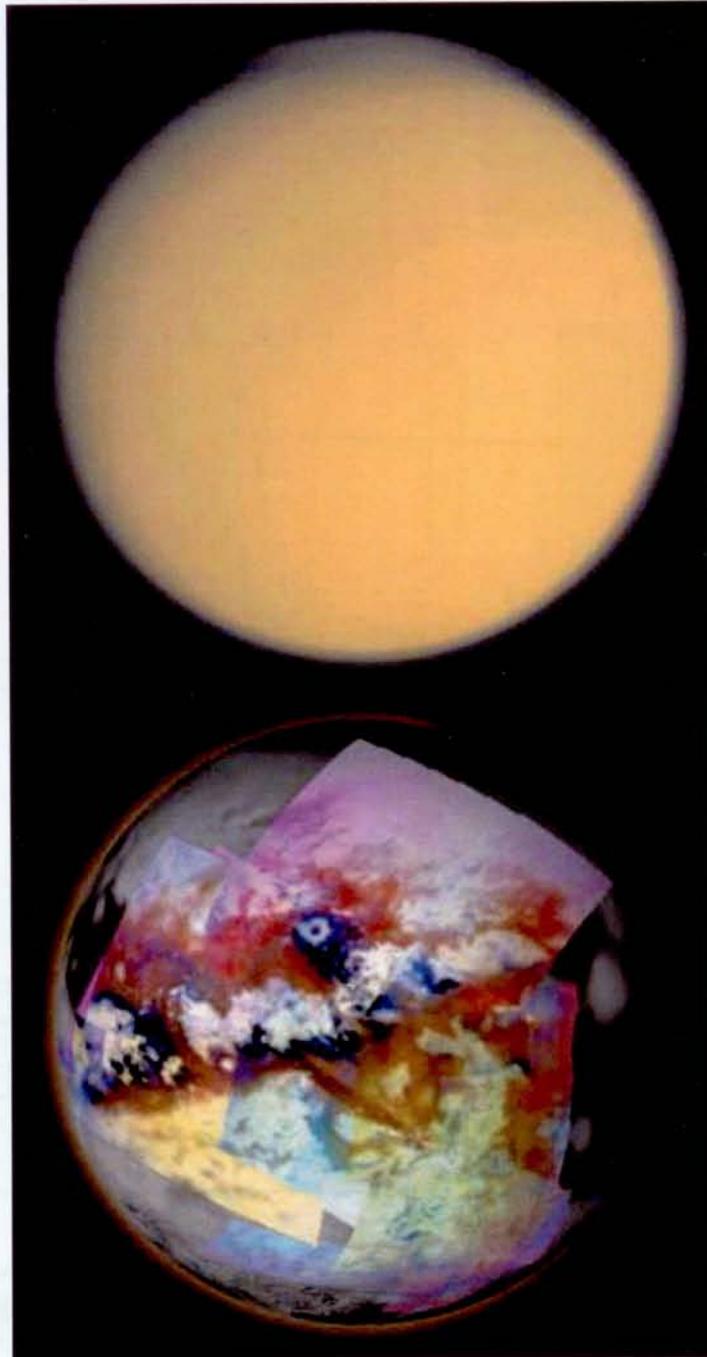


Planche 2 : (a) Exemples de spectres de Mars enregistrés par le spectro-imageur OMEGA de la sonde Mars Express. (b) mêmes spectres décalés pour plus de clarté. (c) composite couleur de la zone de Syrtis Major (orbite 422\_4). Le rouge vif indique la présence d'olivine, le bleu du clinopyroxène et le cyan d'un mélange orthopyroxène avec clinopyroxène. (d) dépôts de gypse autour de la calotte polaire nord : profondeur de bande à 1.92 entre 0 (bleu foncé) et 22 % (rouge) superposée à une composition colorée de la calotte ( $R = 1,5\mu\text{m}$ ,  $V = 1,3\mu\text{m}$ ,  $B = 1,08\mu\text{m}$ ) sur lequel la glace d'eau apparaît en cyan. (e) dépôts d'oxydes de fer dans Aram Chaos ( $R = 1,32\mu\text{m}$ ,  $G = 1,11\mu\text{m}$ ,  $B = 0,97\mu\text{m}$ ). (f) cartes globales de répartition des clinopyroxènes et orthopyroxènes déduites d'une analyse par mélanges linéaires (l'échelle donne la contribution dans le spectre et non un pourcentage en masse). Les spectres 1, 2, 3 et 4 sont extraits de l'orbite 422\_4. Le spectre 5 de l'orbite 401\_3 et le spectre 6 de l'orbite 902\_1.

Plate 2: (a) Examples of Mars spectra taken by the OMEGA imaging spectrometer onboard Mars Express. (b) same spectra offset for clarity. (c) false color composite of Syrtis Major area (orbit 422\_4). The bright red indicates olivine, blue corresponds to clinopyroxene and cyan to a mixture of orthopyroxene and clinopyroxene. (d) gypsum deposits at the border of the North polar cap. The 1.92  $\mu\text{m}$  band depth is shown between 0 (dark blue) and 22% (red), overlaying a false color composite of the cap ( $R=1.5\mu\text{m}$ ,  $G=1.3\mu\text{m}$ ,  $B=1.08\mu\text{m}$ ) where water ice appears in cyan. (e) iron oxides deposits in Aram Chaos ( $R=1.32\mu\text{m}$ ,  $G=1.11\mu\text{m}$ ,  $B=0.97\mu\text{m}$ ). (f) global maps of clinopyroxenes and orthopyroxenes distribution derived from a linear unmixing analysis. Spectra 1, 2, 3 et 4 are extracted from orbit 422\_4. Spectrum 5 from orbit 401\_3 and spectrum 6 from orbit 902\_1.



*Planche 4 : En haut : Titan dans le visible, tel qu'on le verrait à l'œil nu. En bas : Titan en fausses couleurs, vu par le spectromètre imageur VIMS (R = 1,59/1,27  $\mu\text{m}$ , V = 2,03/1,27 $\mu\text{m}$ , B = 1,27/1,08  $\mu\text{m}$ ). Données acquises lors des 13<sup>e</sup> et 17<sup>e</sup> survols en avril et septembre 2006.*

*Plate 4: up : Titan in the visible, as it would be seen by naked eyes. Bottom : Titan seen in false colors by the VIMS imaging spectrometer (Red=1.59/1.27  $\mu\text{m}$ , Green=2.03/1.27 $\mu\text{m}$ , Blue=1.27/1.08  $\mu\text{m}$ ). Data acquired during the 13<sup>th</sup> and 17<sup>th</sup> flybys in April and September 2006.*

ARTICLE PAGE 19, S. LE MOUÉLIC, C. SOTIN