

Rosetta : zoom sur VIRTIS H

Un spectromètre haute résolution pour l'étude de la comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko

Stéphane ERARD

Responsable français de l'instrument VIRTIS/Rosetta
LESIA, Observatoire de Paris/PSL Research University/CNRS/
Université Pierre et Marie Curie/Université Paris-Diderot, Meudon
stephane.erard@obspm.fr

La mission Rosetta est la troisième pierre angulaire du programme Horizon 2000 de l'ESA. C'est la première mission étudiée pour se mettre en orbite, et pour se poser, sur une comète. La mission tire son nom de la pierre de Rosette qui permit à Jean-François Champollion de traduire les hiéroglyphes égyptiens et de reconstituer ainsi l'histoire de l'Égypte antique. De manière un peu similaire, la mission doit permettre de comprendre les premiers stades d'évolution du Système solaire en étudiant des objets primitifs, très peu modifiés depuis cette époque. Le profil de mission incluait donc également le survol de deux astéroïdes primitifs durant la croisière : (2867) Steins et (21) Lutetia, qui n'ont été que peu chauffés ou hydratés depuis leur formation.



Vue d'artiste de Rosetta à l'approche de la comète 67P/Churyoumov-Gerasimenko.

des glaces [1]. L'instrument VIRTIS résulte d'une collaboration tri-nationale : la voie H a été fabriquée au LESIA (Observatoire de Paris), la voie M par Selex-Galileo à Florence, l'électronique et le logiciel de bord à la DLR (Berlin). L'ensemble est sous responsabilité italienne (investigateur principal : F. Capaccioni, IAPS/INAF, Rome).

Description instrumentale

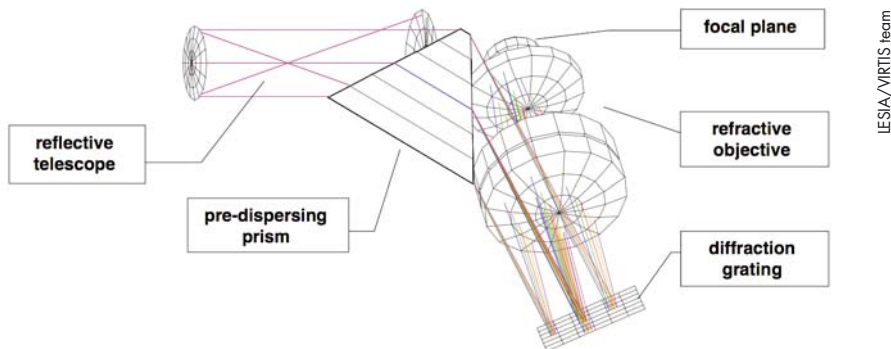
VIRTIS-M est un spectro-imageur moderne, qui disperse l'image d'une fente sur un détecteur bidimensionnel. L'une des directions est spectrale, l'autre spatiale (le long de la fente). La seconde dimension spatiale est acquise au cours du temps, soit en laissant la surface défilier sous la sonde, soit en pointant avec un miroir de balayage. 256 spectres sont acquis simultanément, ce qui permet de cartographier l'objet observé (surface ou coma). La résolution spectrale de la voie M est $\lambda/\Delta\lambda \sim 300$, ce qui permet de mesurer les absorptions des minéraux et des glaces en surface. La résolution angulaire est de 0,25 mrad pour une résolution maximum au sol de ~ 2.5 m (variant avec l'altitude

Rosetta devait initialement partir en 2003 vers la comète 46P/Wirtanen, pour l'atteindre en 2011. Le lancement ayant été reporté en mars 2004, le plan de vol et la comète cible ont été modifiés pour adopter la configuration actuelle. La sonde a rejoint 67P/Tchourioumov-Guérassimenko en mai 2014 et a déposé à la surface son atterrisseur Philæ en novembre. Elle l'accompagnera ensuite sur son orbite jusqu'en décembre 2015, après un passage au plus près du Soleil le 13 août 2015.

Parmi les instruments sélectionnés sur l'orbiteur, VIRTIS procède à des observations de spectroscopie de 67P/

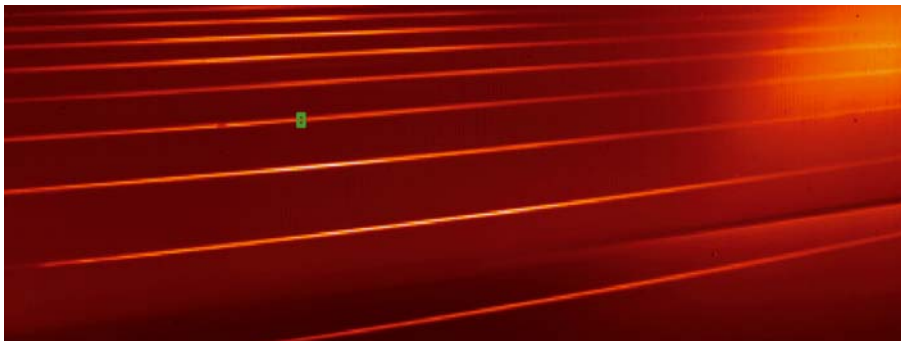
Tchourioumov-Guérassimenko dans le domaine visible et proche infrarouge. L'étude porte aussi bien sur le noyau de la comète que sur la coma¹, et permet d'identifier les principaux composants ainsi que leur abondance et dans une certaine mesure les conditions physiques. L'association d'un spectro-imageur visible-proche infrarouge (VIRTIS-M) et d'un spectromètre infrarouge à dispersion croisée (VIRTIS-H) fournit une combinaison optimale pour étudier la variabilité de la surface et les signatures subtiles de l'atmosphère et

¹ Le noyau de la comète est entouré d'une fine atmosphère brillante constituée de gaz et de poussières, appelée chevelure ou coma.



LESIA/VIRTIS team

Figure 1. Schéma optique de VIRTIS-H. La fente est placée dans le plan focal du télescope, avant le collimateur. Le terme FPA (*focal plane assembly*) désigne le système de détection installé dans le plan focal (détecteur et électronique de proximité).



LESIA

Figure 2. Image du détecteur VIRTIS-H illuminé. Le réseau disperse dans la direction horizontale. Les ordres successifs sont séparés dans la direction verticale par le prisme. L'ordre grandes longueurs d'onde est en bas, on distingue la limite du filtre juste au-dessus. Le rectangle vert représente le champ de vue dans un canal spectral.

de la sonde). Le domaine spectral exploité va de 0,22 à 5,1 μm , ce qui couvre les principales signatures attendues (silicates, sulfides, matière organique, glaces) et permet de mesurer la température de la surface côté jour.

VIRTIS-H est quant à lui un spectromètre échelle, utilisant un prisme suivi d'un réseau dispersant la lumière dans la direction orthogonale à celle du prisme (figure 1). Le domaine spectral 1,9-5,1 μm est dispersé en 8 ordres sur un détecteur infrarouge bidimensionnel en HgCdTe (décrit en détails plus loin dans l'article). L'instrument a donc un champ de vue ponctuel, mais une résolution spectrale bien plus élevée que la voie M ($\lambda/\Delta\lambda \sim 1700$ à 3500). Seule une petite partie du détecteur est utilisée pour la mesure (figure 2).

Design optique

VIRTIS-H est composé de quatre parties principales : un module afocal en entrée, un système dispersif, un objectif, et un détecteur dans le plan focal [2].

- Le module afocal est composé de deux paraboles hors-axe en aluminium (télescope et collimateur) partageant le même plan focal, dans lequel est disposée la fente d'entrée du spectromètre. Un obturateur placé près de la fente permet de fermer le champ et de mesurer le courant d'obscurité. Ce module est monté sur un banc réalisé dans le même matériau que les miroirs ; l'ensemble constitue un système achromatique compact, qui peut être réglé en lumière visible à température ambiante.
- Le module de dispersion est composé d'un prisme et d'un réseau en réflexion. Le système exploite 8 ordres du réseau, qui sont séparés dans la direction perpendiculaire par un prisme en MgO. En évitant le recouvrement des ordres successifs du réseau, ce système permet non seulement d'exploiter un large domaine spectral, mais facilite aussi grandement la calibration radiométrique. Les ordres 6 à 13 du réseau sont



ILLUMINEZ LE MONDE



Diodes Lasers Pulsées

Gamme de Produits

PLDs à 850 nm
10,5 W

PLDs à 905 nm
Mono-émetteur
Empilement

Versions multi-jonctions
jusqu'à 650 W

PLDs à 1550 nm
Versions sécurité oculaire
jusqu'à 45 W

Versions Spéciales

PLDs fibrées

Modules à
diode laser pulsée

Versions Spécifiques Clients

www.lasercomponents.fr



Figure 3. VIRTIS durant les tests au sol à Florence. L'instrument est entouré de ses protections thermiques. On distingue à gauche le baffle de la voie H, à droite celui de la voie M. La plaque supérieure sert de radiateur.

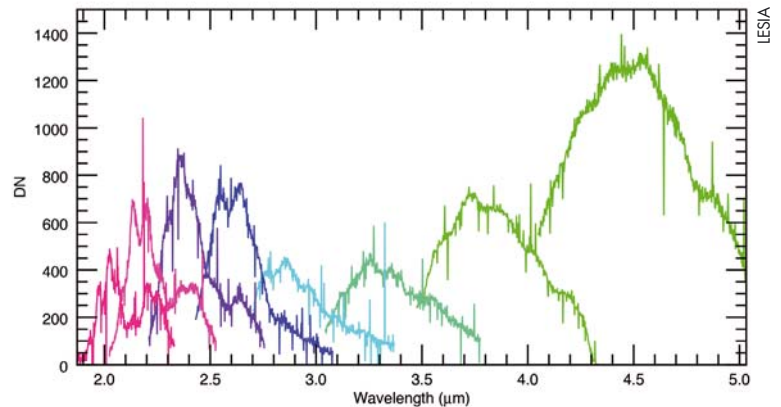


Figure 4. Spectre brut de VIRTIS H, tel que transmis au sol (le courant d'obscurité est soustrait à bord). Les 8 ordres sont affichés en couleurs. La réponse globale dans chaque ordre est liée à l'efficacité du réseau.

utilisés afin d'obtenir une dispersion comparable sur la matrice de détection. Le réseau échelle, gravé à 29,29 lignes/mm, est divisé en deux parties ayant des longueurs d'onde de blaze différentes (respectivement 26,16 μm et 28,24 μm), ce qui permet d'obtenir un profil d'efficacité élargi dans chaque ordre.

- Le faisceau est repris par un objectif F/2 composé de deux lentilles en silicium et d'une lentille en germanium. La première lentille de silicium, proche du réseau, est elliptique afin de réduire au mieux l'aberration sphérique.
- Le détecteur disposé dans le plan focal est protégé par un filtre à deux zones, qui isole l'ordre grandes longueurs d'onde (4,1 μm à 5,0 μm). Le rôle de ce filtre est d'éliminer le fond thermique, c'est-à-dire la lumière émise par l'instrument lui-même, qui n'est pas dispersée spectralement par le réseau. L'ensemble des parties optiques est maintenu à 130 K par refroidissement passif afin de limiter le rayonnement thermique dans l'instrument, mais le fond thermique reste important et réduit à la fois la dynamique et le rapport signal/bruit. Il est filtré au-delà de 4,1 μm , sauf dans l'ordre à plus grandes longueurs d'onde où il se superpose au signal attendu.

L'intérêt de ce montage est d'obtenir une bonne résolution spectrale (variant de 1700 à 3500 dans chaque ordre) dans un domaine spectral large. Celui-ci (1,9–5,1 μm) est couvert sur 3456 canaux spectraux.

Le champ de vue étant ponctuel, la qualité optique de l'instrument ne doit être maintenue que près de l'axe optique ; elle est limitée par la diffraction dans l'ensemble du domaine spectral. Le champ total (IFOV) est de $0,58 \times 1,74 \text{ mrad}^2$, correspondant à une région de 1×3 pixels sur la matrice de détection.

Des baffles sont placés à l'entrée du spectromètre, autour de la fente, et entre l'objectif et le plan focal pour réduire la lumière hors champ et les réflexions internes. En position de repos, un couvercle ferme complètement l'instrument pour protéger l'optique de la poussière cométaire.

Un étalonnage radiométrique et deux modules de calibration spectrale sont utilisés dans le spectromètre. Les modules de calibration spectrale utilisent une lampe au tungstène et un interféromètre de Fabry-Perot, qui produit plusieurs lignes spectrales dans chaque ordre. Un de ces modules est observé via un miroir situé sur la face interne du couvercle de protection, qui renvoie le flux vers le télescope. L'autre illumine l'arrière de la fente qui renvoie le flux vers le collimateur. Le module d'étalonnage radiométrique utilise une lampe au tungstène via le miroir du couvercle d'entrée.

Le réglage optique de l'instrument est effectué au moyen de cales dures qui le rendent très stable. Tout d'abord, la tête optique afocale (télescope/fente/collimateur) est ajustée à température ambiante en utilisant les cales du télescope et du collimateur. En raison de l'uniformité

du matériau, le système reste ajusté à la température de travail beaucoup plus basse (~130 K), en particulier les mêmes longueurs d'onde se projettent au même endroit du détecteur quelle que soit la température. Le réglage en IR à la température de travail de l'instrument global est ensuite effectué en utilisant les cales portant le détecteur et le réseau.

Détecteur et mesure

Le détecteur utilisé est une matrice HgCdTe Raytheon/IRCOE de 436×270 pixels sur 15 bits. Afin de réduire le courant d'obscurité, il est maintenu à 80 K à l'aide d'un refroidissement actif (machines RICOR K508) qui limite la durée de vie de l'instrument à quelques milliers d'heures en observation (figure 3).

Un faible nombre de pixels reçoit effectivement de la lumière (figure 2). L'image de la fente est réduite à une largeur de 3 pixels sur la matrice ; c'est l'épaisseur de l'arc produit par chaque ordre du réseau. Les pixels illuminés sont lus directement à bord, et sommés par groupes de 5 dans chaque canal spectral afin d'éviter toute perte de signal. Les spectres VIRTIS-H ont 3456 canaux spectraux répartis en 8 ordres. Les ordres successifs ont une partie commune, ce qui implique que les mêmes domaines spectraux sont observés avec deux résolutions différentes (figure 4).

En mode nominal les spectres sont donc extraits et reconstitués à bord avant transmission pour économiser la bande passante. Un mode de secours

beaucoup plus gourmand permet de transmettre toute la matrice pour des opérations de calibration, notamment pour vérifier la carte des pixels éclairés, la registration spectrale, et la présence de lumière parasite.

Le courant d'obscurité est mesuré à fréquence variable, généralement à raison d'un spectre sur 4. Le dernier courant d'obscurité mesuré est soustrait des observations, qui sont transmises avec ou sans compression ; les courants d'obscurité sont transmis séparément, ce qui permet d'affiner la correction une fois sur Terre, en interpolant au moment de la mesure. Dans ces conditions, le rapport signal sur bruit obtenu est couramment de l'ordre de 100 à 500.

En situation de fonctionnement, le courant d'obscurité est de l'ordre de 5000 pas-codeurs, sauf dans l'ordre grandes longueurs d'onde, non filtré, où il peut atteindre les 15 000 pas-codeurs. La saturation est atteinte aux environs de 28 000 pas-codeurs, ce qui contraint le temps de pose maximal (actuellement 3 s pour l'observation du noyau, 6 s pour la coma). Le bruit en $1/f$ devenant important à partir de 10 s d'exposition, les poses longues dans la coma sont effectuées par sommation uniquement. Un problème rencontré avec ces détecteurs concerne une non-linéarité notable à faible flux, et différente pour les deux circuits de lecture entrelacés (colonnes paires et impaires) ; celle-ci est traitée dans le pipeline de calibration au sol, à partir de l'étude des courants d'obscurité.

Utilisation en opérations

Alors que VIRTIS-M est dédié à la cartographie du noyau, la résolution spectrale plus élevée de la voie H permet avant tout une étude plus fine de la coma, puisque les raies de rotation des gaz principaux (H_2O , CO_2 , CO , OCS , CH_4 , etc.) sont résolues. Ceci permet non seulement de détecter les espèces et de mesurer directement la densité de colonne des gaz (intégrée sur la ligne de visée), mais également de déduire leur température rotationnelle, et dans le cas de H_2O de mesurer le rapport ortho/para, qui dépend directement de la

température de formation des molécules dans la nébuleuse primitive.

Sur le noyau, la résolution permet de résoudre le profil des bandes d'absorption de la matière organique et éventuellement des glaces exotiques (méthanol, etc.), ou de séparer les signatures de glace et de minéraux. Par ailleurs, la cadence d'acquisition plus élevée que celle de la voie M permet de résoudre les variations de températures, particulièrement complexes compte tenu de la forme du noyau de 67P. En particulier l'étude des phénomènes d'éclipse d'un lobe de la comète par l'autre permet de comprendre les propriétés thermiques de la surface, liées à sa porosité et à sa structure verticale.

Conclusion

Les développements liés à VIRTIS ont été réutilisés dans le cadre d'autres missions spatiales ; le modèle de rechange en particulier a volé entre 2006 et 2015 sur Venus-Express, et les études ont servi de base pour des propositions d'instruments à destination de Mars, du système de Jupiter, et d'astéroïdes proches.

Après 10 mois d'observation, VIRTIS-H a acquis ~4 Go de données sur 67P (pour 54 Go avec la voie M, avec ses deux détecteurs visible et infrarouge). L'ensemble représente de loin le plus gros jeu de données spectroscopiques concernant une comète, et décrit bien la situation à des distances héliocentriques relativement élevées [3]. Les phases de mission suivantes permettront de comprendre les mécanismes d'évolution de la comète à faible distance du Soleil, lorsque l'activité est complètement développée.

Pour en savoir plus

[1] Coradini *et al.* (2007), Virtis: An imaging spectrometer for the Rosetta Mission. *Space Science Rev.* 128, 529.

[2] Drossart *et al.* (2000), VIRTIS-H: A high-spectral-resolution channel for the Rosetta infrared imaging spectrometer. *Proc. SPIE*, 4131, Infrared Spaceborne Remote Sensing VIII, 78.

[3] Capaccioni *et al.* (2015), The organic-rich surface of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko as seen by VIRTIS/Rosetta. *Science*, 347, 6220.

Plateforme OSICS

Créez vos bancs de test



avec nos modules OSICS

Nouveaux modèles DFB CWDM



Grande
stabilité

Puissance
+10 dBm

Canaux disponibles

| | |
|---------|---------|
| 1270 nm | 1470 nm |
| 1290 nm | 1490 nm |
| 1310 nm | 1510 nm |
| 1330 nm | 1530 nm |
| 1350 nm | 1550 nm |
| 1370 nm | 1570 nm |
| 1390 nm | 1590 nm |
| 1410 nm | 1610 nm |
| 1430 nm | 1625 nm |
| 1450 nm | 1650 nm |

Yenista
OPTICS

Tél. : +33 (0)2 96 48 37 16
sales-emea@yenista.com
www.yenista.com

