HAL
open science

Étude de la composition et des propriétés physiques de surface de la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko : interprétation des données VIRTIS/Rosetta etmesure en réflectance d'analogues cométaires

Batiste Rousseau

To cite this version:

Batiste Rousseau. Étude de la composition et des propriétés physiques de surface de la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko : interprétation des données VIRTIS/Rosetta etmesure en réflectance d'analogues cométaires. Astrophysique [astro-ph]. Université Paris sciences et lettres, 2017. Français. NNT : 2017PSLEO018 . tel-01891951

HAL Id: tel-01891951

https://theses.hal.science/tel-01891951v1

Submitted on 10 Oct 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE DE DOCTORAT

de l'Université de recherche Paris Sciences et Lettres
PSL Research University

Préparée à l'Observatoire de Paris

Étude de la composition et des propriétés physiques de surface de la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko. Interprétation des données VIRTIS/Rosetta et mesure en réflectance d'analogues cométaires.

École doctorale n°127

ASTRONOMIE ET ASTROPHYSIQUE D'ÎLE-DE-FRANCE

Spécialité ASTRONOMIE ET ASTROPHYSIQUE

Soutenue par **Batiste Rousseau**
le 17 Octobre 2017

Dirigée par **Stéphane Érard**

COMPOSITION DU JURY :

M. François Colas
IMCCE - Obs. de Paris, Président du jury

M. Patrick Pinet
IRAP - Obs. Midi-Pyrénées, Rapporteur

M. Philippe Rousselot
Institut UNITAM - Obs. de Besançon, Rapporteur

M. Pierre Beck
IPAG - Univ. Grenoble-Alpes, Examinateur

Mme. Christelle Briois
LPC2E - Univ. d'Orléans, Examinateur

M. Benoît Carry
UMR Lagrange - OCA, Examinateur

M. Fabrizio Capaccioni
IAPS - INAF, Examinateur

M. Stéphane Érard
LESIA - Obs. de Paris, Directeur de thèse

Cette thèse a été préparée au Laboratoire d'Études Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique (LESIA) – département de l'Observatoire de Paris et UMR 8109 du CNRS – et au sein de l'école doctorale Astronomie et Astrophysique d'Île-de-France (ED 127). L'Observatoire de Paris est membre de l'Université de recherche Paris Sciences et Lettres.

ADRESSE DU LABORATOIRE :
LESIA
5, place Jules Janssen
92190 Meudon

SITE INTERNET :
Du LESIA : http://lesia.obspm.fr/
De l'Observatoire de Paris : https://www.obspm.fr/
De PSL : https://www.univ-psl.fr/fr

INFORMATIONS SUR CE DOCUMENT :
Ce document a été produit sous le logiciel libre LyX. La version numérique contient des liens hypertexte internes (références, tables et figures) permettant de faciliter la navigation, ainsi que des liens externes.

Résumé

Lors de leur formation il y a 4,6 milliards d'années, les comètes ont intégré des matériaux transformés selon les conditions physiques et dynamiques du disque d'accrétion mais aussi une part de composés issus du milieu interstellaire. Parce qu'elles ont préservé leurs propriétés, étudier les comètes permet de mieux comprendre les conditions régnant dans le disque proto-planétaire entourant le jeune Soleil à une époque qui nous est inaccessible. Cela permet également de comprendre les différentes populations de comètes, leur processus de formation, leurs évolutions dynamiques, leur activité lorsqu'elles s'approchent du Soleil ou encore leur structure.

La sonde européenne Rosetta a accompagné la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko pendant deux ans. À son bord, une dizaine d'instruments ont permis d'étudier l'évolution de son activité, les gaz, la morphologie de surface ou les poussières parmi d'autres objectifs. VIRTIS est le spectromètre visible-infrarouge de Rosetta. Sa composante d'imagerie spectrale, VIRTIS-M, permet d'avoir accès à la dimension spatiale tout en bénéficiant d'une résolution spectrale modérée tandis que VIRTIS-H est un spectromètre ponctuel bénéficiant d'une plus grande résolution spectrale. Mon travail a reposé sur le traitement et l'analyse des données de ces instruments et se découpe en deux parties concentrées sur l'étude de la surface du noyau.

La première est une analyse des paramètres spectraux et photométriques : albédo, pente spectrale, direction principale de la diffusion de la lumière par les particules, rugosité macroscopique. Dans une étude globale, j'ai mis en évidence les variations spatiales de certains de ces paramètres ; comparé les résultats issus de différents modèles ainsi que des deux instruments. J'ai ensuite déterminé localement ces paramètres, soulignant des différences selon le type de terrains ciblé. Ces études permettent de mieux comprendre les mécanismes liés à l'activité (dépôt/soulèvement de poussières, variations de la teneur en glace) ou aux variations des propriétés de la surface (composition, texture).

Le deuxième enjeu de cette thèse était de reproduire en laboratoire les observations réalisées par VIRTIS, et ce afin d'apporter des contraintes sur la composition et la texture de la surface. En collaboration avec l'IPAG de Grenoble j'ai donc mené des expériences consistant à produire des poudres très fines constituées de matériaux similaires à ceux que l'on suspecte d'être présents sur le noyau de 67P : matière organique (imitée par un charbon), silicates (olivine) et sulfures de fer (pyrite et pyrrhotite) sont ainsi tous observés dans les comètes ou leurs analogues. Je les ai ici broyés à des échelles micrométriques à nanométriques puis j'ai réalisé des mesures en réflectance dans la même gamme spectrale que VIRTIS. J'ai pu ainsi étudier les effets provoqués par les variations de la taille des grains, de la composition ou de la texture du mélange, mettant en avant des combinaisons reproduisant le spectre moyen de la comète. De manière générale, cette étude permet de mieux comprendre l'influence de matériaux rarement étudiés comme les sulfures de fer ainsi que le comportement spectral de poudres dont la taille des grains atteint un ordre de grandeur proche de celle de la longueur d'onde, ce qui est primordial dans l'étude des surfaces cométaires.

Mots-Clés

Comète – Rosetta/VIRTIS – Analyse de données – Imagerie hyperspectrale – Spectroscopie – Expériences de laboratoire

Abstract

During the Solar System formation, 4.6 billion years ago, comets accreted materials which have been transformed according to the physical and dynamical conditions of the accretion disk. They also accreted a part of components coming from the interstellar medium. By preserving a primordial composition, the study of comets allows us to better understand the conditions of the proto-planetary disk surrounding the young Sun of an epoch which is now inaccessible. Moreover, it consists also to understand the various comets populations, their formation process, dynamical and activity evolution as they inward and outward the Sun or their structure.

The ESA/Rosetta mission followed the comet 67P/Churyumov-Gerasimenko for two years. A ten of instruments has been dedicated to the study of the evolution of its activity, gas release, surface morphology, dust and other objectives. VIRTIS is a visible/infrared spectrometer instrument. It is composed of VIRTIS-M, an imaging spectrometer which gives access to spatial information with moderate spectral resolution and VIRTIS-H, a point spectrometer with a higher spectral resolution. This study is based on the data analysis of VIRTIS instruments and is divided into two parts focused on the study of the nucleus surface.

The first part is an analysis of the spectral and photometric parameters : albedo, spectral slope, the main direction of the light diffusion by particles, macroscopic roughness. In a global study, I highlighted the spatial variations of albedo and spectral slope ; compared results derived from different models as well as from both instruments. Then, I determined these parameters locally, revealing differences between two types of terrains. This approach allows to better understand the mechanisms linked to the activity (dust drop-off/uprising, space weathering, ice content variation) and also to the surface properties (composition, texture).

The second goal of the thesis is to reproduce in the laboratory the observations realized by VIRTIS to give constraints on the composition and texture of the surface. In collaboration with IPAG (Grenoble, France) I led experiments consisting of the production of very fine powders made of materials which look like those we suspect to be present on the nucleus of 67P : organic matter (mimicked by a coal), silicates (olivine) and iron sulfides (pyrite and pyrrhotite) are all observed on comets or their analogues. I ground them to micrometric to nanometric scales and I realized reflectance measurements in the same spectral range than VIRTIS. Then, I have been able to observe effects caused by the variations of the grain size, composition or texture of the mixture and to highlight combinations reproducing the mean comet VIRTIS spectrum. Finally, this work enables us understanding the influence of material poorly studied such as iron sulfides as well as the spectral behaviour of powders composed of grain sizes reaching an order of magnitude close to the wavelengths, which is essential in the study of cometary surfaces.

Keywords

Comet – Rosetta/VIRTIS – Data analysis – Hyperspectral imaging – Spectroscopy – Laboratory experiments

Remerciements

Je souhaite tout d'abord remercier François Colas, Patrick Pinet, Philippe Rousselot, Pierre Beck, Christelle Briois, Benoît Carry, Fabrizio Capaccioni et Stéphane Érard pour avoir accepté de faire partie de mon jury. Merci à Patrick Pinet et Philippe Rousselot pour leur lecture attentive du manuscrit et leur courage face aux fautes d'orthographe. Merci à tous pour les discussions échangées et les différentes remarques apportées lors de cette soutenance. J'ai apprécié avoir un tel jury, que ce soit en tant que président, rapporteurs ou examinateurs.

Merci à Stéphane Érard, mon directeur de thèse, pour ces trois années durant lesquelles nous avons travaillé ensemble. La confiance et l'autonomie dont j'ai bénéficié tout en étant aiguillé et soutenu lors des moments plus difficiles m'ont permis de mener à bien cette thèse. J'ai également profité d'un cadre exceptionnel grâce à Stéphane : réaliser une thèse portant sur une mission spatiale comme Rosetta et avoir eu l'opportunité d'être impliqué au sein de l'équipe VIRTIS a été fantastique. Participer aux réunions d'équipes et aux moments clés de la mission, qui plus est lors de sympathiques voyages, a été une expérience très enrichissante tant sur le plan personnel que professionnel. Merci énormément pour tout cela.

L'Observatoire de Paris, et plus particulièrement mon laboratoire d'accueil le LESIA, ont été des lieux très agréables pour travailler. Après Orsay et son parc arboré je ne pouvais espérer mieux en bordure de Paris. Pourtant si, il y a les perruches, pies, corbeaux, pigeons ramiers et les renards de Meudon qui planent, piaillent ou rodent à l'Observatoire ! Au-delà du cadre, les personnes que j'ai rencontrées et qui m'ont aidées dans les différentes démarches administratives ont toutes été d'une grande gentillesse. Je pense bien entendu à Claudine, Ourdya, Sylvaine, Denis, Agnès et Cris qui ont été disponibles et d'une efficacité redoutable. Je pense également au GIL : Florence, Suda, Goran et Julien.

Merci à mes collègues du LESIA : pour tous ces moments partagés, que ce soit autour d'une assiette, d'un café ou d'un gâteau évidemment. Que ce soit pour parler du prochain Star Wars, d'un film quelconque, d'un jeu, de voyages ou de la conquête de Mars j'ai apprécié toutes les discussions que nous avons eu. Merci à toutes les générations de thésards : « les quatre vieux » Mélody, Cateline, Jean-Loup et Vincent ; les « contemporains » : Clément P., Diane (merci pour ce super voyage en Californie !), Clément F., Lucas, Charlie et Tabatha pour ne citer qu'eux ; les plus jeunes (mais de pas grand-chose et parfois plus vieux) : Desh mon co-bureau évidemment, merci pour cette coloc' de bureau, pour avoir accepté la compagnie mais aussi de prendre soin de mes plantes, pour m'avoir supporté quand j'écoute de la musique ; je pense aussi à Doriann, Christophe, Nicolas, Léa, Corentin et Mona. Bon courage à tous pour la fin de la thèse ou des études ! Enfin il y a bien sur les post-docs et permanents : toute l'équipe planéto que je ne vais pas énumérer, merci pour m'avoir accueilli, soutenu, suivi durant ces trois ans. Merci en particulier à Dominique, Nicolas, Sandrine, Cédric, Benjamin, Pedro, François pour leurs conseils, leur aide ou le soutien qu'ils m'ont apporté ainsi que les discussions et les rires partagés.

Traversons la France rapidement pour aller à Grenoble. Merci à Éric Quirico et Pierre Beck pour m'avoir accueilli à l'IPAG et permis de faire les manips de dingue de la partie III (c'est un teaser pour le lecteur ça). J'ai énormément apprécié ce que j'ai pu faire dans ce chouette labo, y (re-)découvrir une autre

façon de travailler et de faire de la planétologie : avec les mains ! Je tiens également à remercier Bernard Schmitt, Olivier Brissaud pour leur aide et les échanges que nous avons eu. Merci aussi à Antoine Pommerol et Olivier Poch pour leur aide à distance (et pour les échantillons !). Merci à tous pour ces connaissances que m'ont apportées ces séjours Grenoblois. Merci à Pierre pour me permettre de revenir cette année !

Revenons à Paris et plus précisément à la Cité des Sciences. Merci à tous mes collègues et amis que j'ai rencontrés là-bas. Marlène, Valérie (ma coach pour un sketch que je n'oublierai pas !), Lisa, Nadège, Aurélie, Alain, Jean-Baptiste, Marie, Fawzila, Graziela, Anaïs, Cyril, Laure, Isabelle (les deux !), Gilles et bien sûr Olivier pour la confiance accordée durant ces trois ans et pour m'avoir ouvert les portes la première fois. J'ai énormément appris en médiation à leurs côtés et j'ai surtout apprécié leurs personnalités et l'équipe qu'ils forment. Je n'oublierai pas cette expérience à la Cité ! Je pense aussi aux doctorants que j'ai rencontré là-bas et avec qui j'ai partagé de très bons moments : Louis bien sûr, mais aussi Thomas, Céline, Hélène, Jan, Mathieu, Sandra, Marie, Florent et tous les autres.

Restons dans la médiation et allons du côté du parc Montsouris, à l'Association Française d'Astronomie. Merci à Nicolas Franco pour m'avoir permis de faire de l'animation et de conforter ce qui est une passion aujourd'hui. J'ai beaucoup appris à l'AFA à travers des cadres très variés, j'y ai aussi rencontré des gens géniaux : Max, Jessica, Joël, Mélissa, Christian, Florent, Rémi ou Edgard plus récemment et sans compter tous ceux dont j'ai croisé la route en anim' !

Merci à ma famille venue de Normandie et d'ailleurs et à mes amis Bourguignons d'avoir pu faire le déplacement pour la soutenance. J'ai extrêmement apprécié ce moment et leur présence représente beaucoup à mes yeux. Présents ou non ce jour-là, peu importe, le soutien qui m'a fait poursuivre dans cette voix pendant toutes ces années depuis l'enfance vient en grande partie d'eux.

Cette thèse aurait été différente et bien triste sans mes amis. Bastien (merci d'avoir fait le déplacement !), David et Étienne qui m'accompagnent depuis bien longtemps maintenant et avec qui je partage tant de souvenirs ! Arthur et Camille, présents depuis le collège, si on compte ça fait...bah ouai quand même. Je pense aussi à mes trois Normands (les précédents le sont aussi en fait) : Blandine, Paul et Benoît. De l'eau a coulé sous les ponts depuis les parties de tarot et de poker au lycée mais j'apprécie toujours autant leur compagnie, que ce soit sur un chemin de rando mais finalement plus souvent autour d'un verre désormais. Merci pour m'avoir soutenu pendant cette thèse et ces années d'études ! J'espère que vous réussirez à me supporter encore longtemps ! Spécial dédicace pour Jérémy au détour d'une ligne (tékaté mec on va y arriver !) et une pensée pour Marina la boss des Astrojeunes. Enfin il y a bien entendu les planétoyolo : Anthony (si tu ne m'as pas tué en deux mois de Mongolie, tu as bien failli le faire en une semaine d'Islande ! On recommence ?), Lucile, Anne, Zuriñe, Laura, Kelly, Marietta, Jason ainsi que Chouchou et Damien bien sûr. Merci merci merci pour avoir été là, pour tous les excellents moments passés ensemble ou avec chacun d'entre vous depuis le master et que ce soit à Paris, Berlin, Nantes, Grenoble, Bruxelles ou Bern ! Je me souviens de tout et j'espère que les occasions de revivre de telles expériences ne vont pas s'arrêter de sitôt ! A tous mes amis, merci mille fois car sans vous la vie n'aurait pas cette saveur !

Revenons à la famille mais du côté de Dieppe cette fois. Tout d'abord ma belle-famille, nombreuse, très nombreuse : Claude et Coralie, Clara et Hugo, Clovis, Jojo, Margot, Scrapy, Mimi, Moumousse,

Pouic Pouic, Barnabet, Baba, Mouny, Chaussette, Fripouille, Bubble et Didi. Sa taille n'a d'égale que sa gentillesse (si c'est pas beau ça !). Je les remercie pour leur soutien, pour leurs jolis dessins, peintures, illustrations, mais en premier lieu pour leur spontanéité et leur générosité à tous que j'apprécie plus que tout.

Je souhaite remercier du fond du cœur Colin et Perrine, mon frère et ma sœur, à plusieurs milliers de kilomètres ou non je sais qu'ils m'ont toujours soutenus. Le petit frère arrivant enfin à la fin d'un long parcours, leur présence le jour de ma soutenance m'a énormément touché, cela n'aurait pas été pareil sans eux.

S'il est banal de dire que je ne serai pas « là » sans ma mère, je dois préciser que si elle ne m'avait pas montré la Voie Lactée un soir d'été à Brazey-en-Plaine, puis cultivé ma curiosité, ma soif de savoir et de découvrir l'astronomie par la suite pendant toutes ces années à grandir, mon chemin n'aurait peut-être pas croisé celui des planètes. Pour ça et pour tout ce qu'elle a fait pour moi, tout ce qu'elle m'a transmis, je la remercie infiniment bien que ces mots ne suffisent pas. Je pense évidemment à mon père, qui me manque plus que tout et dont je ne doute pas qu'il aurait été heureux de voir son Tistou arriver là.

Mes derniers remerciements iront vers Claudia, m'accompagnant au quotidien et éclairant ma vie de tous les jours de ses couleurs chatoyantes et de sa lumière réconfortante. Une thèse est une épreuve parfois difficile, parfois fantastique, faite de doutes et d'enthousiasme. Claudia m'a permis de ne garder que le meilleur de tout ça et de croire en ce que je fais, pour cette thèse comme pour la vie en générale. Merci pour tout, merci pour cette vie partagée, merci pour me combler de bonheur.

Table des matières

Renseignements **i**

Résumé **iii**

Abstract **v**

Remerciements **vii**

Introduction générale **1**

I Introduction sur les comètes **5**

Introduction (de l'introduction) **7**

1 Vous avez dit « comète » ? Petit panorama sur la question **9**

1.1 Vision historique et caractéristiques générales 9

1.2 Origines et dynamiques 11

1.3 La question de l'héritage du milieu interstellaire dans la composition des comètes 14

2 L'étude des comètes avant la mission Rosetta **17**

2.1 Lien entre la coma et le noyau 17

2.2 Étude de la surface des noyaux cométaires 19

2.3 Quid des échantillons et des analogues cométaires 23

2.3.1 La mission Stardust 24

2.3.2 Les *Interplanetary Dust Particles* et les *Antarctica Micrometeorites* 25

3 La mission Rosetta et son périple avec la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko 29

3.1 67P/Churyumov-Gerasimenko : cible de la mission Rosetta 29

3.2 Objectifs scientifiques et instruments 30

3.2.1 Grandes lignes 30

3.2.2 Instruments 34

3.3 Quelques résultats relatifs au noyau de 67P 37

II Analyse des données VIRTIS : étude photométrique et thermique du noyau de 67P/CG 45

Introduction 47

4 La spectro-imagerie au service de l'exploration planétaire - L'exemple de VIRTIS à bord de la sonde Rosetta 49

4.1 Principes de fonctionnement 49

4.2 L'instrument VIRTIS/Rosetta 54

4.2.1 VIRTIS-M 56

4.2.2 VIRTIS-H 57

4.2.3 Détails techniques et problèmes connus 59

4.2.3.1 Calibration absolue 59

4.2.3.2 Refroidissement - Cryocooler 60

4.2.3.3 Filtre infrarouge 61

4.2.3.4 Pixels chauds 61

4.2.3.5 *Pixel map* 62

4.2.3.6 Effet « pairs-impairs » 62

4.2.3.7 Réseaux de diffraction 63

4.2.3.8 Lumière diffusée 64

4.2.4 Calibration et filtrage des données 64

4.3 Le jeu de données VIRTIS 66

4.3.1 Déroulement global de la mission 67

4.3.2 Conditions d'illumination du noyau et géométries d'observations 68

4.3.3 Contraintes sur l'analyse du jeu de données 69

4.3.4 Suivi des observations et enrichissement de l'archive VIRTIS 70

5 Étude des propriétés photométriques de la surface de 67P avec VIRTIS **75**

5.1 Principe 75

5.2 Grandeurs photométriques et concepts utiles 76

5.2.1 Géométrie d'observation 76

5.2.2 Mesure du flux 77

5.2.3 Albédos 78

5.2.4 Diffusion simple et diffusion multiple 78

5.2.5 Effets d'opposition 79

5.2.6 Rugosité – Rugosité macroscopique 80

5.3 Modèles 80

5.3.1 Le modèle de Lommel-Seeliger 81

5.3.2 Le modèle de Hapke 81

5.3.3 La fonction d'ombrage 82

5.3.4 Les fonctions de phases 83

5.3.5 Limites 84

5.3.6 Méthode utilisée pour la dérivation des paramètres photométriques 85

5.4 Étude à l'échelle globale 87

5.4.1 Incertitudes et données retenues 88

5.4.2 Détermination du paramètre $\bar{\theta}$ 90

5.4.3 Albédo de diffusion simple, pentes spectrales et paramètre d'asymétrie 91

5.4.4 Variations spatiales de l'albédo de diffusion simple et de la pente spectrale . . . 94

5.4.5 Comparaison entre VIRTIS-M et VIRTIS-H 97

5.4.6 Comparaison entre le modèle de Lommel-Seeliger et le modèle de Hapke simplifié 100

5.4.6.1 Fonction de phase Henyey-Greenstein à un lobe 102

5.4.6.2 Fonction de phase Henyey-Greenstein à deux lobes 105

5.5 Limites de l'étude 109

5.6 Étude locale 111

5.6.1 Données utilisées 112

5.6.2 Paramètres photométriques 113

5.6.3 Discussion 116

6 Étude thermique de la surface de 67P : caractérisation des températures obtenues par VIRTIS-M et VIRTIS-H 121

6.1 Enjeux, méthodologie et contraintes 121

6.2 Modèle thermique 123

6.3 Résultats 124

6.3.1 Évaluation de l'impact du décalage des champs de vue 124

6.3.2 Comparaison des températures dérivées à partir de VIRTIS-M et de VIRTIS-H . 126

Conclusion et perspectives 128

III Approche expérimentale pour l'étude de la composition de 67P/CG : analyse de poudres ultra-fines comme analogue de surfaces cométaires 133

Introduction 135

Problématique 137

7 Protocole expérimental et échantillons 139

7.1 Dispositif et protocole expérimental pour les mesures de réflectance 139

7.1.1 Généralités sur le spectro-gonio-radiomètre 139

7.1.2 Du spectro-gonio-radiomètre au micro spectro-gonio-radiomètre 140

7.1.3 Protocole de mesure 142

7.1.4 Grandeur physique mesurée et calibration des données 143

7.2 Spectre de référence de 67P/CG 146

7.2.1 Sélection et répartition des données 146

7.2.2 Traitement des données 146

7.3 Matériaux utilisés 147

7.3.1 Matière organique 148

7.3.1.1 Charbon - Le PSOC 1532 148

7.3.2 Sulfures de fer 152

7.3.2.1 Pyrite 153

7.3.2.2 Pyrrhotite 154

7.3.3 Silicates 158

7.3.3.1 Dunite 159

7.4 Préparation des échantillons 161

7.4.1 Nouveautés de l'approche dans la production des poudres : le broyage planétaire 161

7.4.2 Mélanges des différentes poudres 164

7.4.3 Contrôle de la taille de grains et du type de mélange par imagerie 166

8 Résultats des mesures de réflectance sur les poudres d'analogues cométaires 171

8.1 Phases pures . . . 171

8.1.1 PSOC 1532 . . . 172

8.1.2 Pyrrhotite . . . 174

8.1.3 Dunites . . . 175

8.2 Mélanges binaires de grains sub-micrométriques . . . 177

8.2.1 PSOC 1532 et silicates . . . 178

8.2.2 Pyrrhotite et silicates . . . 180

8.2.3 PSOC 1532 et pyrrhotite . . . 180

8.2.4 Résumé . . . 182

8.3 Mélanges ternaires de grains sub-micrométriques . . . 182

8.4 Mélanges à tailles de grains variées (« mixtes ») . . . 184

8.4.1 Mélanges binaires PSOC 1532 :Pyrrhotite, impact de la concentration en pyrrhotite 186

8.4.2 Mélanges binaires PSOC 1532 :Pyrrhotite, impact de la taille des grains de PSOC 1532 . . . 186

8.4.3 Mélanges ternaires PSOC 1532 :Pyrrhotite :Dunite, impact de la concentration en dunite . . . 188

9 Discussion 191

9.1 Introduction . . . 191

9.2 Phases pures - Effets de la taille des grains . . . 197

9.2.1 Dunite . . . 197

9.2.2 PSOC 1532 . . . 198

9.2.3 Pyrrhotite . . . 200

9.2.4 Conclusion sur les phases pures . . . 205

9.3 Mélanges binaires micrométriques - Effets de la composition . . . 206

9.3.1 Mélanges intimes . . . 206

9.3.2 Mélanges spatiaux et avec agrégats . . . 207

9.3.3 Conclusion sur les mélanges binaires . . . 209

9.4 Mélanges ternaires micrométriques - Effets de la composition dans les mélanges intimes et avec agrégats . . . 210

9.5 Mélanges mixtes . . . 210

9.5.1 Phases pures . . . 210

9.5.2 Mélanges binaires mixtes . . . 211

9.5.3 Mélanges ternaires mixtes . . . 213

Conclusion : implications pour la surface de 67P **214**

Conclusion générale et perspectives **218**

Bibliographie **222**

Table des figures **253**

Liste des tableaux **260**

Annexes **262**

Liste des communications relatives à la thèse **331**

Résumé **337**

Introduction générale

Alors qu'on les observe et note leurs passages depuis des millénaires, il a fallu attendre le XVIIIème siècle pour que Edmond Halley comprenne la nature périodique des comètes et calcule le retour de celle qui portera son nom. Jusqu'à cette époque, seules les queues de poussières et de gaz d'une comète, de plusieurs millions de kilomètres, étaient visibles lorsque celle-ci est active. L'incompréhension face à ces phénomènes transitoires et non expliqués a bien entendu apporté son lot d'explications de faits « historiques » (mort d'un personnage illustre par-ci, victoire d'une bataille par-là...), de superstitions et de peurs quelconques.

C'est seulement dans la deuxième moitié du XXème siècle que l'on acquiert une vision réaliste de ce que sont les comètes. En 1950, Fred Whipple propose un modèle de noyau cométaire capable d'expliquer les observations. Ce modèle se verra ensuite confirmé lorsqu'en 1986, des sondes spatiales survolent pour la première fois une comète (qui n'est autre que 1P/Halley) et nous en donnent alors la vision moderne : ce sont des objets de taille kilométrique dont la surface est très sombre ; elles sont composées de matériaux réfractaires (silicates, sulfures de fer...), de matières organiques (basée sur les atomes de carbone, hydrogène, oxygène et azote) et avant tout de glaces (eau, dioxyde de carbone...) qui se sublimeront lorsque la comète se rapprochera du Soleil.

Pourquoi s'intéresser à ces cailloux glacés ? Après leur formation dans le disque protoplanétaire il y a 4.5 milliards d'années, les comètes ont été en grande partie éjectées aux confins du Système Solaire, à des distances où la température et la densité d'objets sont bien trop petites pour qu'elles ne connaissent la moindre évolution. De plus, il est possible que la jeune Terre ait été percutée par certaines d'entre elles il y a 3.9 milliards d'années, lors du grand bombardement tardif, apportant potentiellement à la Terre eau et matière organique. C'est donc principalement pour ces raisons que l'on s'intéresse aux comètes.

La mission Rosetta de l'Agence Spatiale Européenne, développée dans l'objectif d'accompagner une comète et non d'effectuer un unique survol, a suivi 67P/Churyumov-Gerasimenko dans sa course autour du Soleil. Pour la première fois, elle a ainsi permis l'étude temporelle de l'activité et des propriétés de la surface, à la fois sur le long terme donc mais aussi sur l'ensemble de la comète. La surface du noyau se présente justement comme un sujet d'étude intéressant, c'est en effet à cette interface complexe que le chauffage du Soleil impose des contraintes thermiques importantes et permet aux glaces de se sublimer. L'activité engendrée provoque des modifications visibles qu'il est important d'étudier pour

mieux cerner les mécanismes qui la gouverne. Mais c'est aussi par l'étude de cette surface, couplée à celle des poussières capturées dans la coma, que l'on accèdera à la composition et aux propriétés physiques des grains de matériaux réfractaires et organiques qui s'y trouve.

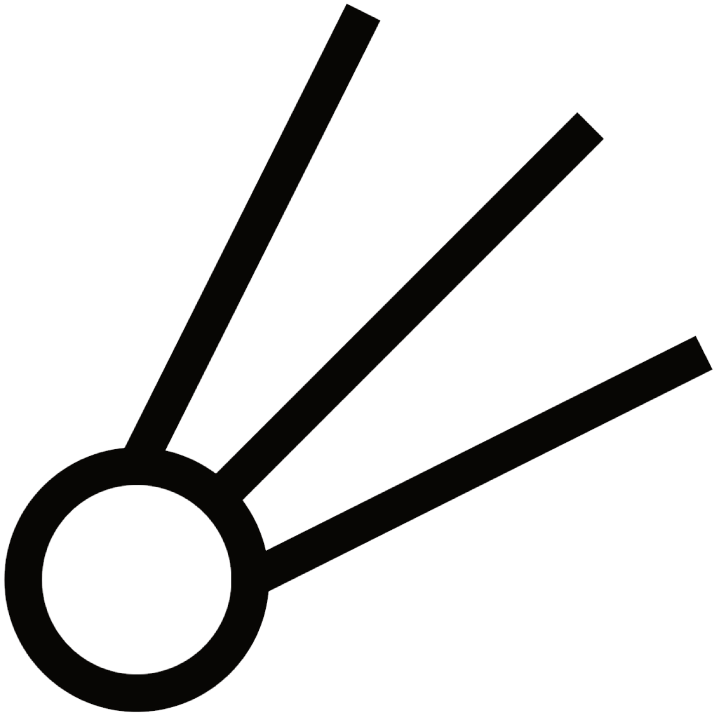
VIRTIS est le spectromètre imageur de la sonde Rosetta et c'est avec les données de cet instrument, sensible dans le visible et l'infrarouge, que j'ai étudié la surface de 67P. J'ai utilisé les observations à géométrie très variée réalisées par VIRTIS pour réaliser une étude photométrique – c'est à dire étudier la façon dont la lumière interagit avec la surface – afin d'en déduire ses propriétés. Cette étude photométrique a notamment été l'occasion de tester différents modèles mais aussi de confronter les jeux de données des deux voies optiques de VIRTIS. J'ai par ailleurs cartographié certains paramètres photométriques et spectraux à l'échelle globale et mis en évidence à l'échelle locale des variations de ces paramètres entre des terrains aux morphologies différentes.

Mais la compréhension des comètes passe aussi par l'expérimentation en laboratoire où l'on tente de reproduire des observations à partir de matériaux analogues. Il s'agit bien ici de la deuxième partie du titre de cette thèse. Lors de celle-ci, j'ai eu la chance de passer trois mois à l'IPAG, l'Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble. Les expériences que j'ai menées à l'IPAG ont eu pour objectif de reproduire les observations de VIRTIS. Après le choix des matériaux, l'effort s'est concentré sur l'état des échantillons, en particulier la taille des grains qui les constituent mais aussi sur la façon dont ils sont mélangés entre eux. On sait en effet que les grains cométaires ont des tailles très petites, de quelques dizaines de nanomètres à quelques centaines de microns. Grâce à un nouvel instrument, j'ai réduit en poudre les matériaux originaux dont les grains atteignent alors des tailles de l'ordre du micromètre et inférieur. J'ai ensuite réalisé des mesures de réflectance dans la même gamme de longueur d'onde que VIRTIS. Cela m'a permis de reproduire partiellement le spectre de 67P et donc d'apporter des indications quant à sa composition. Cela m'a également conduit à étudier les effets des différentes tailles de grains, des différents types de mélanges et des variations dans la composition des échantillons.

Ce manuscrit se découpe en trois parties, chacune divisées en trois chapitres. La partie I permettra d'introduire le sujet plus en détails : le chapitre 1 donne le contexte de l'étude des comètes et pourquoi on les étudie ; le chapitre 2 se concentre sur l'étude des comètes avant la mission Rosetta et par l'intermédiaire des échantillons ou analogues cométaires rapportés par la mission Stardust, récoltés dans l'atmosphère ou tombés sur Terre ; enfin le chapitre 3 décrit la mission Rosetta, ses objectifs et quelques résultats qu'il est important de mentionner dans le cadre de cette étude.

La partie II page 45 contient le travail réalisé sur l'analyse du jeu de données VIRTIS. Le chapitre 4 détaille les principes de la spectro-imagerie avant de se concentrer sur l'instrument VIRTIS et son jeu de données. Le chapitre 5, après la description des grandeurs et des modèles utilisés développe l'analyse photométrique réalisée à partir des données VIRTIS sur la surface de 67P, dans un premier temps à l'échelle globale puis à l'échelle locale. Enfin le chapitre 6 contient une étude thermique ayant pour objectif de comparer les deux voies de VIRTIS.

La partie III page 133 correspond au travail expérimental mené en collaboration avec l'IPAG pendant cette thèse. Le chapitre 7 présente les instruments employés, la définition des protocoles et les matériaux sélectionnés. Le chapitre 8 rapporte l'ensemble des mesures de réflectance réalisées sur les échantillons produits à l'aide d'un spectro-gonio-radiomètre. Enfin, le chapitre 9 discute des résultats obtenus.



Première partie

Introduction sur les comètes

Introduction (de l'introduction)

L'étude des comètes étant un vaste sujet, cette première partie se veut donc généraliste et permettra de définir ces objets dans les grandes lignes. On s'intéressera dans le premier chapitre aux caractéristiques générales, à l'origine dynamique et à la formation des comètes mais aussi à la vision que l'on a eu de ces objets pendant longtemps. On évoquera la révolution apportée par l'exploration spatiale et ce qu'elle permet. L'étude des comètes se joint à celle de domaines plus éloignés, elle pose notamment la question des liens avec la matière du milieu interstellaire, point que nous aborderons également.

Le deuxième chapitre évoquera plus longuement les missions spatiales ayant étudié les noyaux cométaires et leur environnement avant Rosetta. On détaillera cet environnement, la coma, et plus particulièrement les liens qu'elle possède avec le noyau avant de s'intéresser de près à ce dernier et aux propriétés générales de sa surface. Étudier les comètes passe également par l'étude d'échantillons ou d'analogues. On abordera ce sujet à travers la mission Stardust qui a rapporté sur Terre des poussières capturées dans la queue d'une comète mais aussi avec les micrométéorites et les poussières interplanétaires récupérées sur Terre ou dans l'atmosphère et dont une partie provient des comètes.

Le troisième chapitre se concentrera sur la mission Rosetta. L'historique de cette mission, ses objectifs ainsi que les différents instruments et leurs rôles seront évoqués. Enfin, les principaux résultats concernant le noyau de 67P/Churyumov-Gerasimenko seront également rapportés.

Chapitre 1

Vous avez dit « comète » ? Petit panorama sur la question

Les petits corps du Système Solaire représentent une des catégories d'objets orbitant autour de notre étoile autres que les planètes, les planètes naines (Pluton, Cérès...) et leurs satellites. Ce sont des objets en orbite autour du Soleil mais ne dominant pas leur voisinage d'un point de vue gravitationnel. Ce sont également des corps qui ne sont pas suffisamment massifs pour être en équilibre hydrostatique, c'est à dire que la force de gravité ne l'emporte pas sur celle de cohésion. Ce dernier point résulte du fait que les petits corps ne sont pas sphériques. Telle est la définition de l'Union Astronomique Internationale concernant cette catégorie d'objet. Les astéroïdes et les comètes répondent donc à ce critère. Bien qu'il n'existe pas de précision sur la taille (elle est indirectement dictée par la notion d'équilibre hydrostatique mais dépend des objets, de leur histoire et de leur composition), on considère qu'ils sont généralement regroupés par familles orbitales et/ou à partir des informations que l'on a de leur composition. La figure 1.1 donne un classement possible des corps que l'on trouve dans le système solaire. Cependant, ce classement n'illustre pas une réalité certaine pour plusieurs raisons : (1) il est sujet à l'évolution des définitions de ces différentes catégories d'objets ; (2) il ne représente pas toutes les catégories d'objets ; (3) ces catégories mélangent des critères de classification différents (il existe plusieurs critères pour définir une planète naine alors que les objets transneptuniens ou les plutinos reposent sur une description dynamique uniquement).

1.1 Vision historique et caractéristiques générales

Longtemps les comètes n'ont été connues qu'à travers la manifestation de leur activité, visible depuis le ciel de la Terre dans certains cas. Une comète est active parce qu'elle est composée de glaces (H_2O, CO_2, CO...) qui se subliment lorsque la distance au Soleil est suffisamment petite pour apporter une énergie suffisante à ce processus. Non seulement les différentes glaces ont des températures de sublimations différentes, le monoxyde de carbone se sublimant ainsi avant l'eau et donc à une plus grande distance

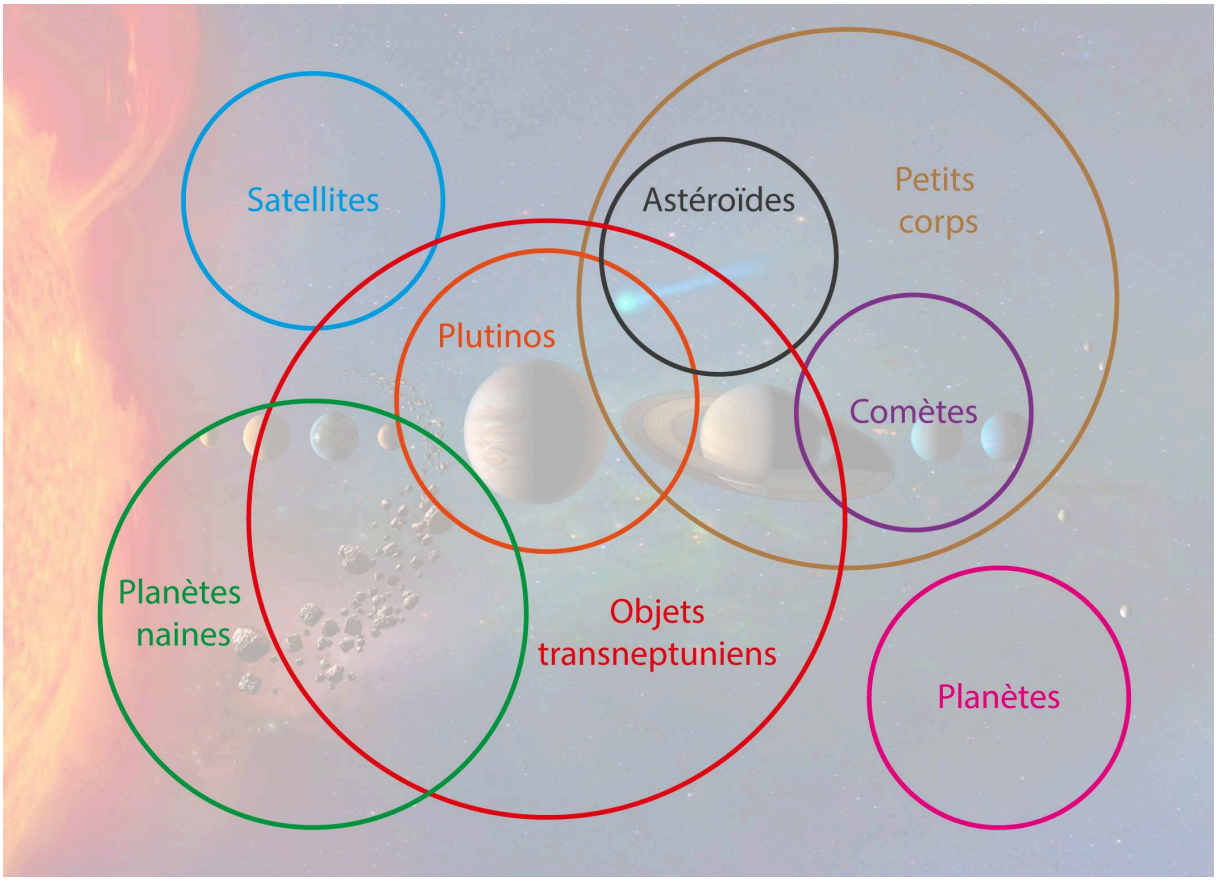


FIGURE 1.1 – Exemple possible de diagramme d'Euler classant les catégories d'objets du Système Solaire. Les comètes appartiennent aux groupes des petits corps et sont pour certaines des objets transneptuniens comme les astéroïdes. Ce diagramme n'est pas exhaustif car il mélange différents critères de classification. Crédit image de fond : NASA.

du Soleil, mais en plus, l'activité d'une comète sera variable d'un objet à l'autre selon sa composition globale, sa porosité ou son « âge » (au sens de sa vie active, sans mauvais jeu de mots).

Il a fallu attendre 1950 pour que Fred Whipple (Whipple, 1950; 1951; 1955) propose un modèle de noyaux cométaires à la fois réaliste et tenant compte des observations réalisées jusqu'alors. Celles-ci montrent que la queue des comètes est en partie faite de gaz (observations de Giovanni Donati en 1864), que les étoiles filantes sont liées aux comètes (étude de l'essaim des Perséides par Giovanni Schiaparelli en 1867) et surtout qu'il existe une force non gravitationnelle agissant sur les comètes et provoquant une modification de leur période orbitale. Alors que certaines idées de l'époque s'orientent vers un noyau constitué d'un agrégat diffus de particules individuelles, F. Whipple, en faisant l'hypothèse que les gaz observés – c'est-à-dire la queue et la coma cométaire diffusant la lumière solaire – proviennent majoritairement de ce noyau, propose :

> *« On the basis of these assumptions, a model comet nucleus then consists of a matrix of meteoric material with little structural strength, mixed together with the frozen gases – a true conglomerate. »*
>
> Fred L. Whipple, 1950

De là et de cette série de trois articles (Whipple, 1950; 1951; 1955) est née l'idée du modèle de noyau de la « boule de neige sale », les glaces étant les principaux constituants (H_2O, NH_3, CH_4, CO_2...) avec les matériaux météoriques qui désignent ici les matériaux réfractaires en général, observés dans les météorites (Fe, Ca, Mn, Mg, Si, Ni, Al, Na). Whipple propose ainsi un modèle robuste, remettant en question les idées et les concepts de l'époque mais qui sera accepté au fil des ans jusqu'à être confirmé grâce à l'exploration de la comète de Halley en 1986 ; bien que le terme de boule de neige sale ne soit pas le plus adéquat pour décrire la nature d'un noyau cométaire.

Les travaux de Oort sur l'existence d'un réservoir de comètes se trouvant à de très grandes distances du Soleil (voir sous-section 1.2) laissent à penser que les comètes n'ont subi que très peu d'évolution depuis leur formation. C'est ce qui nous intéresse ici particulièrement et qui justifie leur appellation de « reliques » de notre Système Solaire. Les astéroïdes sont généralement plus gros, ils sont moins riches en glaces, moins poreux et majoritairement formés de silicates ou de métaux (à l'exception des astéroïdes carbonés). Ils ont à la fois subit l'hydrothermalisme, la chaleur provoquée par la décroissance radioactive et, en l'absence d'activité provoquant un resurfaçage ils sont plus exposés à l'altération spatiale que les comètes : micrométéorites, rayons cosmiques, vent solaire (Lantz, 2015). Dans ces deux groupes appartenant à la famille des petits corps, les comètes ont donc tendance à être des objets plus primitifs (bien qu'il existe des astéroïdes primitifs). L'activité que les comètes subissent (à condition de s'approcher suffisamment du Soleil) provoque un resurfaçage partiel. Les matériaux les plus primitifs sont donc *a priori* conservés dans le noyau ou dans des zones protégées et inactives à long terme.

Les comètes connues aujourd'hui font pour la plupart quelques kilomètres dans leur plus grande longueur. On note quelques fois des noyaux imposants comme celui de 95P/Chiron d'environ 150 km ou celui de C/1995 O1 (Hale-Bopp) d'environ 80 km. 147P/Kushida-Muramatsu fait quant à elle seulement 420 m. Les plus petites font sans doute quelques mètres et ne sont visibles que lorsqu'elles viennent se bruler les ailes au Soleil (on parle de comètes rasantes, ou « *sungrazing comets* »).

1.2 Origines et dynamiques

Les comètes du Système Solaire forment des familles orbitales que l'on peut classer selon différents paramètres. On les a ainsi longtemps divisées en deux catégories que sont les comètes à longues périodes, dont l'orbite dure plus de 200 ans, et en comètes à courtes périodes dont l'orbite est inférieure à 200 ans (et parmi lesquelles on différenciait les périodes inférieures et supérieures à 20 ans). Cette classification a cependant tendance à être délaissée au profit d'une autre (voir ci-dessous). La région d'origine de la plupart des comètes reste inconnue, notamment pour les comètes à courtes périodes étant donné leurs durées de vie et l'échelle de temps séparant les perturbations orbitales que subit une comète, court dans les deux cas à l'échelle du Système Solaire. Bien qu'inconnue au cas par cas, cette origine peut être déduite grâce aux observations et aux modèles. Au cours des 20 dernières années de nombreuses avancées ont notamment permises d'acquérir une meilleur compréhension de la dynamique des planètes et des petits corps juste après leur formation dans le jeune Système Solaire (Gomes et al., 2005, 2008; Walsh et al., 2011; Levison et al., 2011; Brasser and Morbidelli, 2013). Ainsi, on sait qu'il existe deux à trois principaux réservoirs de comètes :

Le nuage de Oort (ou Öpik-Oort), proposé par Ernst Öpik en 1932 et théorisé par Jan Oort en 1950 (Oort, 1950), est une région englobant le Système Solaire entre 20 000 UA et plus de 100 000 UA environ (voir figure 1.2). Cette région très peu dense mais très étendue renfermerait l'équivalent d'environ 10^{11} noyaux cométaires (Kaib and Quinn, 2009) (soit l'équivalent de plusieurs dizaines de masses terrestres). Selon les marées galactiques ou les perturbations d'étoiles proches, les comètes peuplant cette région peuvent quitter leur orbite pour se précipiter vers le Système Solaire interne. Arrivant avec une très grande vitesse, une excentricité importante et avec une inclinaison quelconque par rapport à l'écliptique, environ la moitié d'entre-elles quittera le Système Solaire (orbite hyperbolique avec $e > 1$). Les autres formeront la famille des comètes à longues périodes ou celle de la famille de Halley lorsque leur orbite a été modifiée après leur premier passage. Une minorité retournent également dans leur région d'origine.

La ceinture de Kuiper est un tore ceinturant le Système Solaire entre 30 UA et 55 UA environ (voir figure 1.2). Comparable à la ceinture d'astéroïdes, elle est cependant bien plus massive et plus étendu et contient nombre de noyaux cométaires. Les objets s'y trouvant, appelés de manière générale Objets de la Ceinture de Kuiper (ou KBOs pour *Kuiper Belt Objects*) ont été découverts (pour les plus gros) à partir des années 90 (Pluton, Charon, Eris, Makemake en font partie). Leur orbite est assez peu excentrique et se trouve à des inclinaisons relativement faibles.

Le disque dispersé, ou épars, découvert vers la fin des années 90 (Luu et al., 1997), semble être la zone d'origine de nombreuses comètes. Situé après la ceinture de Kuiper, il est caractérisé par des orbites très excentriques et pour certaines plus inclinées par rapport à l'écliptique que celles des KBOs (Gomes et al. 2008, dans Barucci (2008)). En plus de corps identiques à ceux de la ceinture de Kuiper il contiendrait environ 6.10^8 noyaux cométaires (Levison et al., 2008). Ces dernières années, les modèles dynamiques sur la formation du Système Solaire et la mise en place des planètes ont beaucoup évolué, notamment à travers le « modèle de Nice » (voir Walsh et al. (2011); Brasser and Morbidelli (2013) des travaux récents) qui permet d'expliquer sa mise en place.

D'après les derniers travaux liés au modèle de Nice (voir notamment Brasser and Morbidelli (2013); Morbidelli, A. and Rickman, H. (2015) et références à l'intérieur) et contrairement à ce qui était pensé avant, le nuage de Oort et le disque épars pourraient être constitué de comètes issues de la même population d'origine. Dans les deux cas, la migration des planètes géantes aurait provoqué l'éjection des comètes se trouvant alors dans une zone allant jusqu'à 30 UA. Cela expliquerait pourquoi il n'y a pas de différences marquées (morphologiques, chimiques...) dans les différentes familles de comètes observées (Morbidelli, A. and Rickman, H., 2015).

Afin de classer les différentes catégories dynamiques de comètes, il est possible d'utiliser le paramètre de Tisserand relatif à Jupiter en tant qu'indicateur. Ce paramètre est défini comme suit :

$$T_J = \frac{a_J}{a} + 2\left[(1-e^2)\frac{a}{a_J}\right]^{1/2}\cos(i)$$

où i et a sont l'inclinaison et le demi-grand axe de l'orbite de l'objet, e son excentricité et a_J le demi-grand axe de l'orbite de Jupiter. Les astéroïdes ont ainsi une valeur de $T_J > 3$ et les comètes à courtes périodes un paramètre de Tisserand compris entre 2 et 3, enfin les comètes à longues périodes ou de

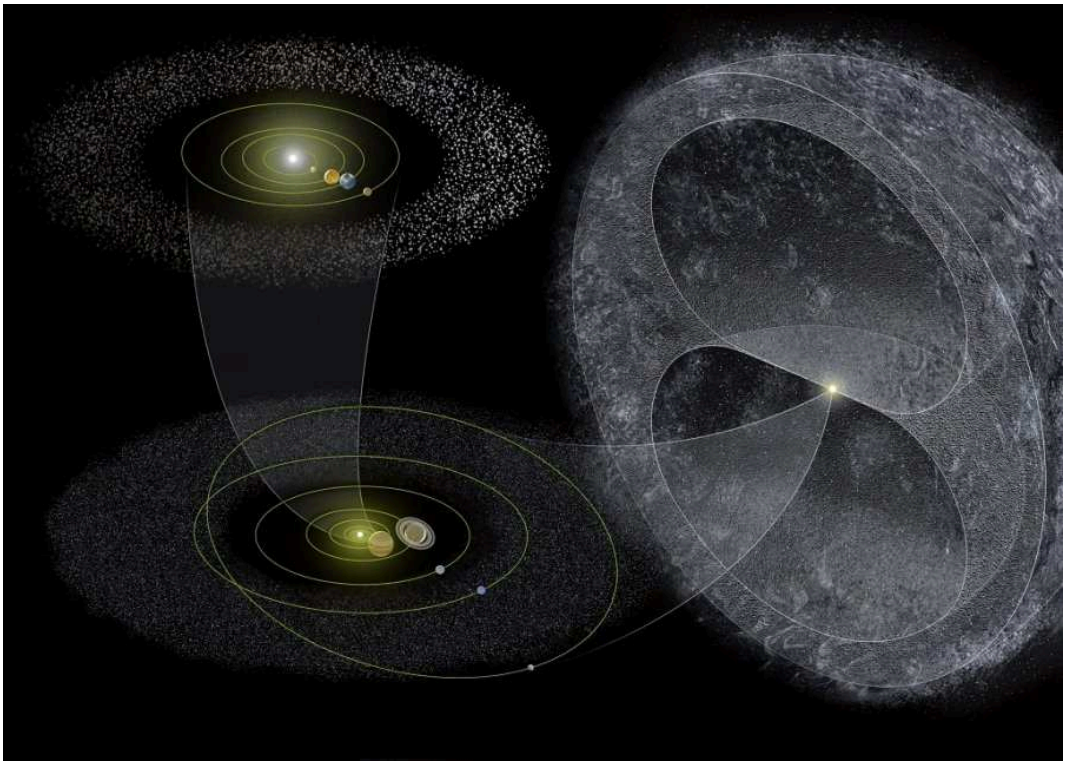


FIGURE 1.2 – Représentation schématique de notre Système Solaire à différentes échelles. En haut à gauche, les planètes internes et la ceinture d'astéroïdes sont visibles. En bas à gauche ce sont les planètes externes et la ceinture de Kuiper qui sont visibles. Enfin, englobant tout ceci, le nuage de Oort, principal réservoir de noyaux cométaires. Crédits : A. Dagan, Ciel et Espace Photos

la famille de Halley ont un $T < 2$. Voici un classement possible des familles de comètes tiré de Meech (2017) :

Longue période Comète dont la période est supérieure à 200 ans.

Dynamiquement nouvelle Comète à longue période réalisant son premier passage (ou un des premier) dans le Système Solaire interne et provenant du nuage de Oort.

Courte période Comète dont la période orbitale est inférieure à 200 ans.

Famille de Jupiter L'orbite de ces comètes est contrôlée par Jupiter, elle est peu inclinée et leur période est inférieure à 20 ans.

Similaire à Halley (« *Halley type* ») La période de ces comètes est intermédiaire, se situant entre 20 et 200 ans et possède une forte inclinaison. Le nuage de Oort en est majoritairement la source.

Similaire à Encke (« *Encke type* ») Toute comète dont l'orbite est à l'intérieur de celle de Jupiter. La comète de 2P/Encke est une comète bien connue à courte période (3.3 ans).

Comète de la ceinture principale Ces objets sont des astéroïdes d'un point de vue dynamique ($T_J > 3$) mais exprime une faible activité, sans doute provoquée par la sublimation de volatils. On retrouve ce type d'objets au-delà de la ceinture principale : par exemple, l'astéroïde cométaire Chiron ($a = 13,6$ UA) est ainsi devenu 95P/Chiron lorsque l'on a découvert cette trace d'activité.

Les comètes font partie des objets ayant une durée de vie courte d'un point de vue dynamique. Leur orbite, si elle se trouve ou passe dans le Système Solaire interne, n'est jamais stable sur une longue

période de temps à l'échelle astronomique. Elle peut être perturbée en raison du passage à proximité d'une planète, géante la plupart du temps : ce fût le cas de la comète Shoemaker-Levy 9 en juillet 1994 mais aussi de 67P/Churyumov-Gerasimenko dans son histoire récente. Une comète provenant du Système Solaire lointain peut aussi finir sa course dans le Soleil ou se disloquer à son approche en raison de sa fragilité : le satellite SOHO, observant le Soleil depuis 1995 a découvert plusieurs milliers de nouvelles comètes dont nombre d'entre elles finirent leur courses au chaud, dans la couronne de notre étoile. Au delà d'une mort provoquée par un changement dynamique, une comète se retrouvant sur une orbite stable finira par épuiser son stock de glaces et deviendra donc inactive ou se disloquera.

1.3 La question de l'héritage du milieu interstellaire dans la composition des comètes

Étudier une comète permet de soulever des questions relatives à la formation du Système Solaire et aux liens que peut avoir le disque protoplanétaire avec le milieu interstellaire. Une étoile et son cortège se forment suite à l'effondrement d'un nuage de gaz et de poussières. Après « l'allumage » de l'étoile, gravite finalement autour d'elle un disque protoplanétaire fait de cette matière qui est donc héritée du milieu interstellaire. C'est à partir de celle-ci que planètes et petits corps du système stellaire se formeront. Tandis que les planètes et une partie des astéroïdes subissent trop d'évolutions pour conserver cette matière primitive, ce n'est pas le cas des comètes. Pour autant, il est difficile de savoir à quel point la matière les constituant est proche de celle du milieu interstellaire. En effet, entre l'effondrement du nuage initial et la formation des différents corps du Système Solaire se déroulent de nombreux phénomènes, notamment dans le disque. Les questions de dynamiques, de compositions et les conditions de pressions, densités et températures sont primordiales pour évaluer comment les matériaux seront transportés ou mélangés, s'ils seront modifiés ou comment ils se formeront à partir d'autres éléments. De nombreuses études portent donc sur la question afin de déterminer les conditions régnant lors de la formation des planètes et petits corps.

Une des questions importantes à propos des liens entre comètes et milieu interstellaire concerne les silicates dont il existe deux formes. Les silicates amorphes sont majoritaires dans le milieu interstellaire et se forment à faible température, selon un processus long et sous l'effet de rayonnement cosmique énergétique qui tend à défaire leur structure interne. Les silicates cristallins, dont la structure interne est quant à elle organisée selon un motif répétitif (bien que non exempt de défauts) se forment en condensant à haute température (1200-1400 K) ou par recuit de silicates amorphes (Hanner, 1999) et sont la forme la plus observée dans les roches aussi bien terrestres qu'extraterrestres. Les comètes contiennent ces deux formes (voir Hanner (1999) et ses références). Celles-ci ne peuvent pourtant pas être issues de la même région de formation et leurs présences soulèvent donc des questions relatives à la formation des comètes et de ses constituants : y a-t-il un mélange dans le disque protoplanétaire de populations de grains issues de régions différentes ? Des températures élevées sont-elles atteintes suite à des collisions, permettant la formation de silicates cristallins, ou est-ce provoqué par des ondes de chocs dans le système solaire externe ? Les échantillons récoltés par la sonde Stardust (voir sous-section 2.3.1, Brownlee (2014) et figure

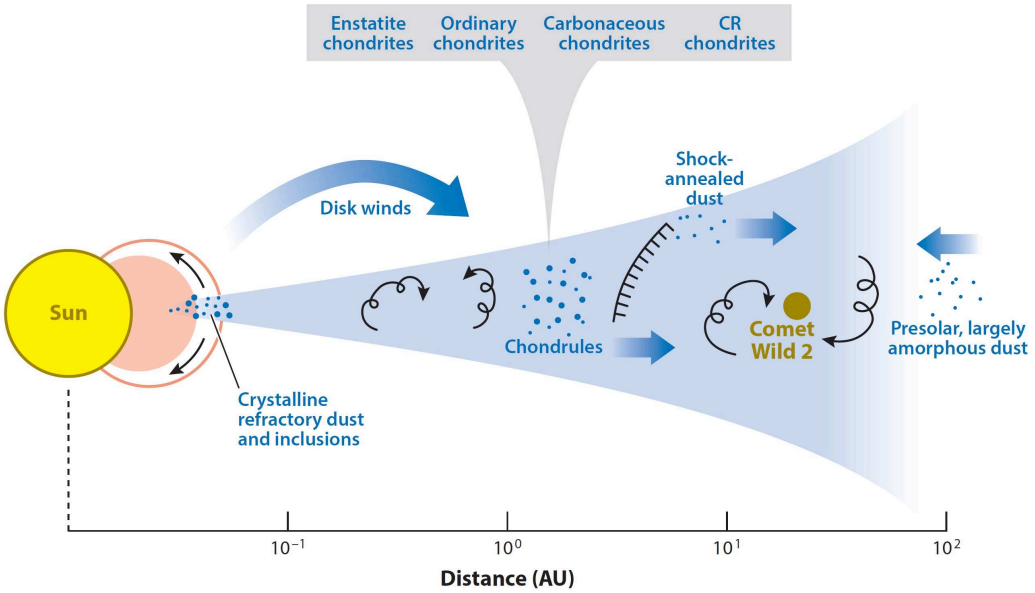


FIGURE 1.3 – Schéma illustrant le transport radial dans la nébuleuse solaire. Les comètes, ici Wild 2, inclue du matériel réfractaire cristallin venant de la région interne ainsi que du matériel amorphe venant des régions externes, non transformé et donc plus primitif. Source : Brownlee (2014)

1.3) ainsi que les modèles de disques (Bockelée-Morvan et al., 2002) suggèrent un mélange radial important permettant d'expliquer la formation de silicates cristallins dans le disque et leur présence dans les comètes. Ces observations et ces simulations sont renforcées par les modèles récents de dynamique sur la migration des planètes (voir sous-section 1.2 et Morbidelli, A. and Rickman, H. (2015) notamment) et par le fait que la signature des silicates cristallins n'est pas observé dans le milieu interstellaire (Kemper et al., 2004).

Les CAIs (*calcium-aluminium-rich inclusions)* sont des inclusions riches en aluminium et en calcium que l'on trouve principalement dans les météorites de type chondrite (Christophe Michel-Lévy, 1968; MacPherson, 2003). Ces inclusions sont parmi les objets les plus vieux du Système Solaire puisqu'ils ont été daté à $4567,30 \pm 0.16$ millions d'années (Connelly et al., 2012). Leur enrichissement en matériaux réfractaires et en ^{16}O indique qu'elles se sont formées à hautes températures ($\sim 1300K$) dans la nébuleuse protosolaire (Connelly et al., 2012). Comme tous les objets primitifs, ce sont donc des sujets d'études intéressants pour « accéder » aux propriétés qui prévalaient à l'époque de leur formation. Bien qu'elles se trouvent majoritairement dans les météorites chondritiques, des objets proches des CAIs ont été trouvés parmi les échantillons collectés par la sonde Stardust (par exemple : Brownlee et al. (2006); Zolensky et al. (2006)). Dès lors, et bien que les comètes se soient formées plus loin du Soleil que les CAIs il est possible d'en trouver parmi les grains cométaires (Brownlee et al., 2006; Zolensky et al., 2006; Paquette et al., 2016). Tout comme le problème des silicates formés près du Soleil mais présent dans les comètes, les CAIs ou des objets semblables ont pu être transportés vers les régions de formation de comètes comme le suggère les résultats des analyses des échantillons de la mission Stardust (voir paragraphe précédent, Brownlee (2014) et figure 1.3).

Chapitre 2

L'étude des comètes avant la mission Rosetta

2.1 Lien entre la coma et le noyau

Une comète est restée pendant très longtemps une manifestation brillante dans le ciel lorsque son activité se déclarait. Par la suite, les astronomes sont devenus capable de déterminer la composition des objets astronomiques à partir de la décomposition de la lumière qu'ils émettent ou réfléchissent. La spectroscopie devint alors un outil puissant dans le domaine. Il faudra cependant attendre longtemps entre l'acquisition du premier spectre cométaire par Donati en 1864, et la compréhension moderne et surtout réaliste de ce qu'est une comète.

Avant tout, on observe les comètes par le biais de leurs queues et leur coma. À des échelles de distances bien supérieures à celle du noyau se forment les queues cométaires que l'on observe depuis la Terre. Lorsque la comète est active, on en identifie généralement deux : l'une de poussières, orientée dans la direction opposée au mouvement de la comète sur son orbite et qui peut être courbée en raison de la dérive des grains de poussières. Cette dérive étant provoquée à la fois par la pression de radiation des photons solaires mais aussi pour les plus gros par l'influence gravitationnelle du Soleil (Fulle, 2004). L'autre est faite d'ions dont la direction est anti-solaire (voir figure 2.1). Ces deux queues s'étendent sur plusieurs millions de kilomètres et les poussières qui y sont contenues forment des essaims durables qui orbitent autour du Soleil. Ces poussières sont cependant sensibles à la pression de radiation du fait de leur petite taille mais un éventuel nouveau passage de la comète qui en est à l'origine pourra venir le ré-alimenter. Ces poussières sont responsables de la lumière zodiacale et des pluies d'étoiles filantes lorsque la Terre en traverse un essaim.

Une comète active relâche poussières et gaz qui sont éjectés à des vitesses importantes en raison de la détente adiabatique. Ces éléments forment la coma, qui constitue en quelques sortes l'atmosphère d'une comète bien qu'elle soit ténue et ne soit pas maintenue par l'attraction gravitationnelle du noyau mais par son alimentation continue en phase d'activité. Dans la coma se forment également de nouvelles espèces chimiques par photo-ionisation ou photo-dissociation. Ainsi, grâce à la sublimation de l'eau, du dioxyde de carbone ou d'autres glaces à partir du noyau – espèces que l'on appellera molécules « mères » –

FIGURE 2.1 – La comète C/1995 O1 (Hale-Bopp) lors de son passage en 1997. D'une brillance exceptionnelle en raison de sa forte activité, elle a été visible pendant 18 mois. La queue d'ions est visible en bleu, la queue de poussières en blanc. Crédits : E. Kolmhofer, H. Raab ; Johannes-Kepler-Observatory, Linz, Autriche (http://www.sternwarte.at).

d'autres molécules, radicaux et ions se formeront (OH, CN, H_2O^+, CO^+, H). D'autres molécules plus complexes sont détectées (récemment l'alcool éthylique (C_2H_5OH) et le glycolaldéhyde (CH_2OHCHO), Biver et al. (2015)) mais restent très minoritaires devant l'eau (voir Biver and Bockelée-Morvan (2016) et ses références pour une revue).

Les comètes ont donc été étudiées *via* l'observation de leur coma et de leur queue pendant longtemps, sans pouvoir distinguer le noyau, ce qui est encore le cas actuellement pour la plupart d'entre elles. Leur observation, que ce soit dans l'infrarouge lointain avec les satellites ISO ou Herschel, ou dans le domaine radio avec le Grand Radio Télescope de Nançay par exemple, a permis de découvrir nombres de molécules qu'une comète pouvait éjecter et former suite à la sublimation des composés volatils (Crovisier and Bockelée-Morvan, 1999). Les sondes spatiales ayant visitées des noyaux cométaires ont par la suite renforcé la connaissance dans les mécanismes conduisant à l'activité de la surface, la chimie à l'œuvre dans la coma et ont permis d'augmenter à nouveaux l'inventaire des molécules qui en sont issues, notamment grâce à Rosetta et son suivi sur le long terme (Le Roy et al., 2015).

Mais la coma d'une comète et sa queue contiennent aussi des poussières qui nous renseignent sur les composés réfractaires du noyau. Ce sont par exemple les silicates qui peuvent être observés grâce à leur signature dans l'infrarouge moyen (Crovisier et al., 1997; Hanner, 1999) ou des organiques dans l'infrarouge proche (Kissel and Krueger, 1987a,b; A'Hearn et al., 2005; Sandford et al., 2006; Matrajt

et al., 2013; Capaccioni et al., 2015; Quirico et al., 2016). Ces poussières peuvent être capturées dans la coma, c'est le rôle d'instruments comme COSIMA, GIADA ou MIDAS sur Rosetta. Ils permettent de caractériser le flux mais aussi la masse, la densité, la structure ou la composition de ces grains et donc de déduire en partie l'état de la surface (Rotundi et al., 2015; Langevin et al., 2016; Merouane et al., 2016; Bentley et al., 2016; Mannel et al., 2016). En partie seulement car les tailles capturées ne sont pas obligatoirement un échantillon représentatif de la surface : les échelles de tailles auxquelles les instruments sont sensibles ne couvrent pas tous les ordres de grandeurs (Henkel et al., 2003; Riedler et al., 2007; Colangeli et al., 2007) et les biais existent selon les processus de capture (Brownlee, 2014). Indépendamment des instruments de mesures *in-situ* (dans la coma), les grains les plus lourds peuvent retomber sur la surface plus facilement que les grains plus légers (Fulle et al. (2017) donne une limite à 1 mg pour 67P), introduisant encore un biais potentiel de représentativité des tailles de grains dans la coma par rapport à ceux présents à la surface. Enfin, les observations depuis la Terre ou l'orbite terrestre (Lisse et al., 2007) sont plus sensibles aux signatures des grains les plus petits (<µm), compliquant ainsi la comparaison entre les différentes études (Brownlee, 2014).

Les liens entre coma et surface sont donc nombreux, aussi bien pour les matériaux volatils que réfractaires. On voit qu'il existe aussi des biais potentiels qui font qu'étudier les réfractaires à partir des observations à distances ou à partir de mesures réalisées dans la coma ne suffit sans doute pas à rendre compte de la réalité du terrain. L'étude de la surface du noyau doit donc passer par des outils qui lui sont dédiés : caméra, imageur hyperspectral, atterrisseur.

2.2 Étude de la surface des noyaux cométaires

L'étude des noyaux cométaires n'a réellement débuté qu'en 1986 lorsque des sondes spatiales ont pu passer à proximité de la comète 1P/Halley. Conscient de l'enjeu déterminant que pourrait avoir une telle exploration sur la vision que l'on avait des comètes, les scientifiques de plusieurs nations ont décidé de mobiliser leurs forces ! C'est ainsi que les agences spatiales Européenne (ESA), Soviétique (Roskosmos) et Japonaise (Jaxa) lancèrent 5 sondes ayant pour but d'étudier la comète et son environnement. La mission européenne Giotto, première mission planétaire de l'agence, permis alors avec les missions Véga 1 et 2 de prendre les premières photographies d'un noyau cométaire (voir photo 1 figure 2.2) et de réaliser les premières dans l'environnement proche de la comète. Les observations font alors part d'un noyau riche en réfractaires, extrêmement sombre (Thomas and Keller, 1989) et avec des zones actives liées à l'activité de sublimations des glaces mais ne représentant qu'une faible proportion de la surface : vision déroutante d'après les idées de Whipple. Plus tôt avant l'arrivée des sondes, la signature de l'eau avait été détectée depuis le sol (Mumma et al., 1986). Elle a été confirmée grâce au spectromètre IKS à bord de la sonde Véga 1 en plus de celle du CO_2 (Combes et al., 1986).

Les comètes sont des objets uniques en ce sens qu'ils sont très peu denses en comparaison des autres objets du Système Solaire. La densité dépend de nombreux paramètres (composition, masse, porosité, rapport poussière/glaces) parfois peu contraints et est donc difficile à évaluer, on connait tout de même celles des noyaux visités par des sondes et elles oscillent entre 0.3 et 0.6. Cette faible densité (plus faible que l'eau !), implique une porosité globale très importante, typiquement de l'ordre de 70% pour 67P par

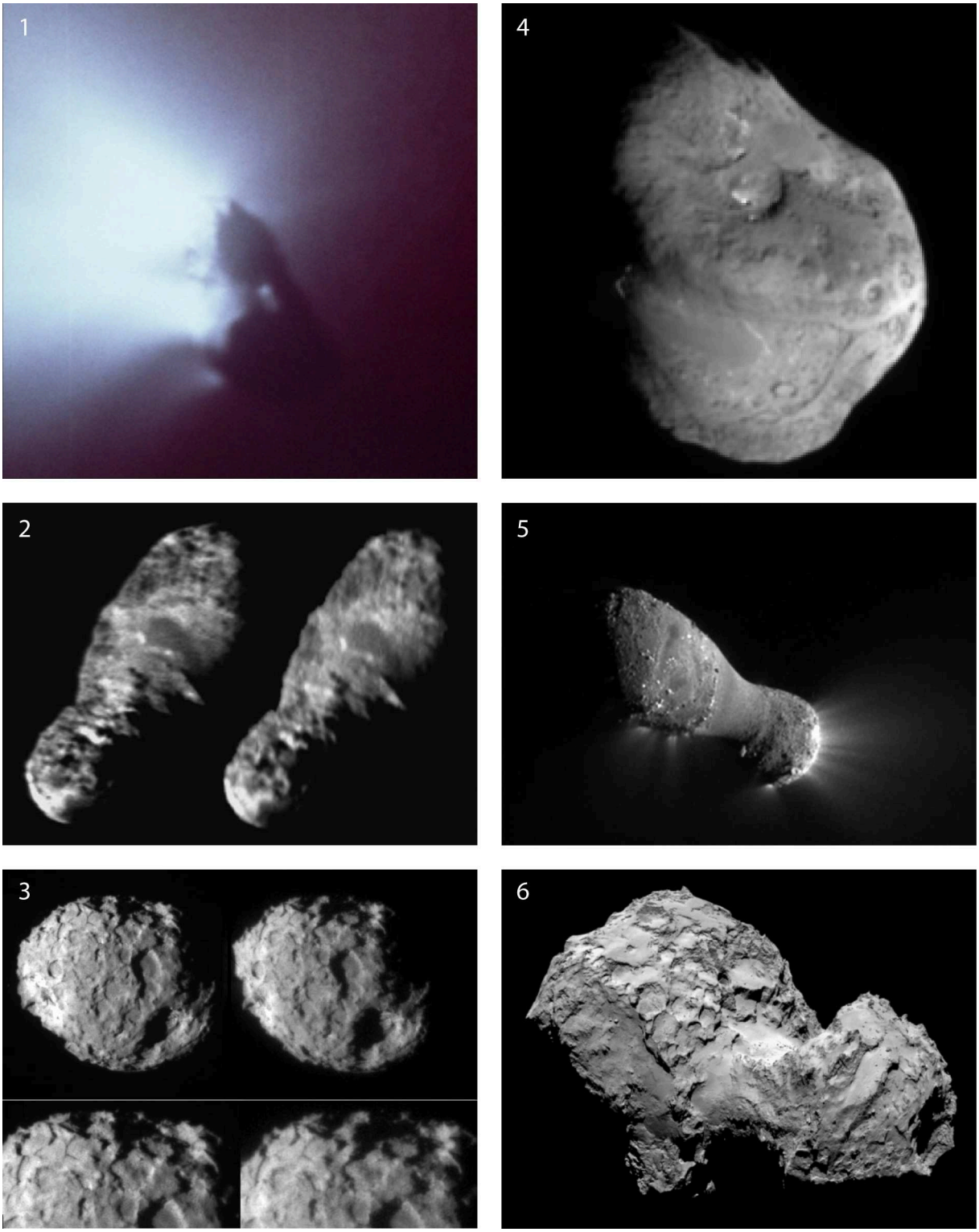


FIGURE 2.2 – Les noyaux cométaires visitées par des sondes spatiales dans l'ordre chronologique numéroté (sondes, crédits). 1. 1P/Halley (Giotto, ESA/MPAe) ; 2. 19P/Borelly (Deep Space 1, NASA/JPL) ; 3. 81P/Wild 2 (NASA) ; 4. 9P/Tempel 1 (Deep Impact, JPL/NASA) ; 5. 103P/Hartley 2 (EPOXI, NASA/JPL-Caltech/UMD) ; 6. 67P/Chruryumov-Gerasimenko (Rosetta, ESA/Rosetta/Navcam). Les photos 2 et 3 sont des vues stéréoscopiques : à bonne distance, plonger votre regard à l'infini de façon à faire converger les deux images pour en former une en « relief ».

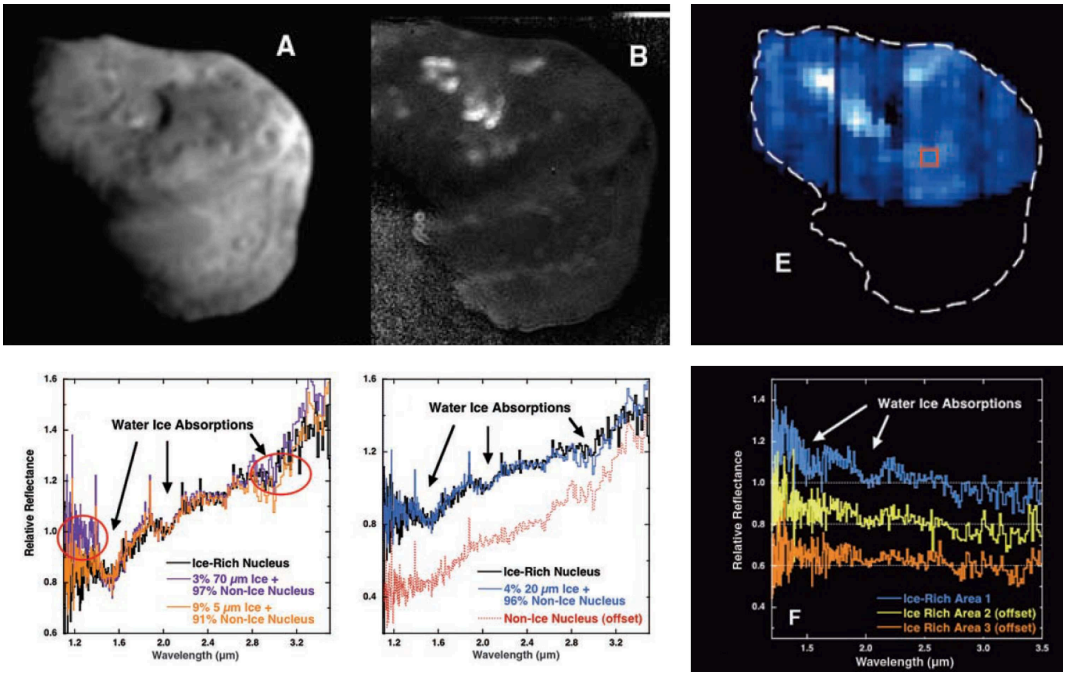


FIGURE 2.3 – Détection de la glace d'eau sur 9P/Tempel 1 par la sonde Deep Impact. En A : image à 750 nm ; en B : image du rapport 450/750 nm mettant en évidence des zones brillantes par rapport au reste de la surface ; en E : données infrarouges. Les spectres orange et violet (bas gauche et milieu) sont des modélisations reproduisant partiellement le spectre de la comète (en noir et normalisé sur le graphique F) où de la glace d'eau est présente. Adapté de Sunshine et al. (2006).

exemple (dont la densité est d'environ 0.53 (Kofman et al., 2015; Hérique et al., 2016; Pätzold et al., 2016)). La formule de la boule de neige sale est donc à prendre avec précaution : non seulement parce qu'avec un rapport poussières/glaces d'environ 4 (pour 67P, Sykes and Walker (1992); Rotundi et al. (2015)) il s'agit plutôt d'une « boule de sale glacée » (pour reprendre l'expression de Keller (1989)) mais aussi parce qu'avec une telle porosité un noyau cométaire est avant tout constitué...de vide ! Il s'agirait cependant de microporosité majoritairement, c'est à dire identique à celle que l'on trouverait à l'échelle de la poussière. Les modèles de formations cométaires, dont certains sont en faveur d'un noyau primitif ne connaissant pas ou de faibles collisions (Jutzi and Asphaug, 2015; Davidsson et al., 2016) ou d'autres au contraire proposant la formation d'un noyau *via* un passé collisionnel important (Morbidelli, A. and Rickman, H., 2015; Jutzi et al., 2017; Jutzi and Benz, 2017) proposent dans tous les cas ce type de porosité. Bien que celle-ci semble augmenter avec la profondeur comme le suggère les résultats de CONSERT et de SESAME-PP sur le site d'atterrissage de Philae (Brouet et al., 2016), une macroporosité présente de façon locale n'est pas à exclure, que ce soit en profondeur et pourquoi pas en surface. En effet, les différentes dépressions circulaires que l'on observe sur différents noyaux cométaires pourraient s'être formées par effondrement suite à la sublimation de glaces situées sous la surface comme le suggère Vincent et al. (2015) et Auger et al. (2015), créant par cette occasion une macroporosité relativement importante (de l'ordre du mètre).

La porosité d'un noyau cométaire joue également un grand rôle dans la sublimation des glaces et donc dans l'activité globale du noyau. Alors que le modèle de Whipple suggérait un noyau avant tout glacé pour expliquer l'activité des comètes, les sondes Giotto et Véga photographient en 1986 le noyau de

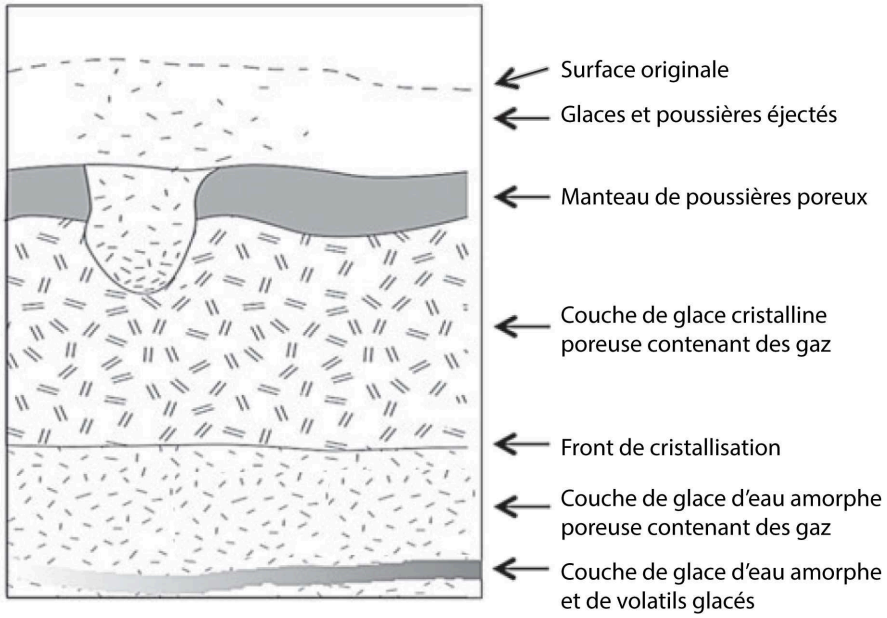
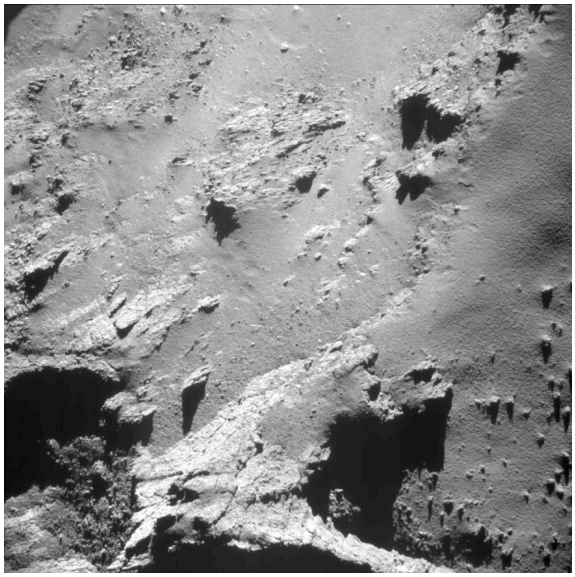


FIGURE 2.4 – Modèle schématique de la structure d'un noyau cométaire. Adapté de Meech (2017) et Prialnik (1997).

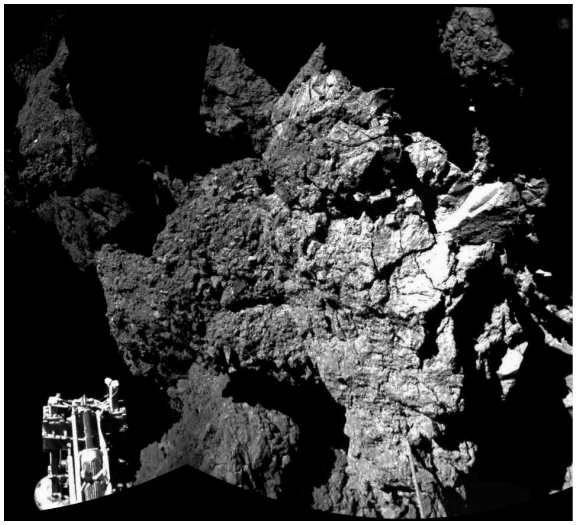
1P/Halley actif sur environ 10% de sa surface seulement (voir figure 2.3). La composante « poussières » semble ainsi majoritaire (Keller, 1989) et par la suite, les différentes missions spatiales n'identifieront que rarement ou de manière très localisée de la glace (voir figure 6.2 et section 3.3 pour 67P). Si les gaz peuvent s'échapper de la surface alors que les glaces n'y sont pas présente c'est justement grâce à l'importante porosité du noyau. Le chauffage de la surface par le Soleil provoque un gradient de température ainsi qu'une onde de chaleur se propageant lentement vers l'intérieur, permettant aux glaces d'atteindre leur point de sublimation.

Une des grandes inconnues reste la structure interne du noyau (voir figure 2.4 pour un des modèles existant). Difficilement accessible hormis grâce à un sondage comme l'instrument CONSERT l'a partiellement réalisé (les résultats sont difficilement exploitables en raison de l'atterrissage scabreux de Philae). Quel est l'état des glaces en profondeur ? Y-a-il notamment de la glace amorphe qui, si elle est présente pourrait contribuer à l'activité en apportant de l'énergie lors de phase de cristallisation (Vincent et al., 2015) ? Comment la porosité évolue à l'échelle du noyau, de même que la distribution des glaces et des matériaux réfractaires ? Autant de questions qui restent sans réponses précises aujourd'hui.

La croûte exposée semble quant à elle parfois recouverte de régolithe et parfois à nue, tout en étant poreuse dans les deux cas et très fracturée (pour 67P voir El-Maarry et al. (2015); Poulet et al. (2016) et figures 2.5a et 2.5b, pour Hartley 2 voir A'Hearn et al. (2011) ; pour Tempel 1 voir A'Hearn et al. (2005); Thomas et al. (2007, 2013) ; pour Wild 2 voir Brownlee et al. (2004) et pour Borelly voir Soderblom et al. (2002); Britt et al. (2004) ainsi que la figure 2.2 pour les différents noyaux). À nouveau l'activité est sans doute la raison des différences de terrain que l'on observe sur les noyaux cométaires. Elle est aussi responsable, avec l'important stress thermique que connait la surface, de ces terrains érodés (El-Maarry et al., 2015; Poulet et al., 2016). Il est envisageable que cette croûte s'épaississe ou du moins qu'elle s'appauvrisse en glace au cours du temps à mesure que la comète passe au périhélie, empêchant



(a) Image NAVCAM de la surface couvrant $\sim$ 330 m de côté et présentant des terrains recouverts de poussières et nus. Crédits : ESA/NAVCAM.



(b) Extrait d'image CIVA/Philae d'une paroi rocheuse sur le site d'atterrissage (la résolution est $\sim$ 0.625 mm/pixel). Adapté de Bibring et al. (2015).

FIGURE 2.5 – Image de la surface de 67P

même localement l'éjection de gaz. L'état exacte de la surface reste également assez flou : comment est agencé le matériau à petite échelle ? Quelle est la taille des plus petits constituants ? Comment et à quel point les matériaux évoluent ou sont-ils préservés au cours du temps ? Certaines de ces questions peuvent être en partie éclaircies par les études portant sur les analogues cométaires.

2.3 Quid des échantillons et des analogues cométaires

Alors que l'on maîtrise l'envoi de sondes à travers l'espace, les choses se compliquent pour le retour d'échantillons... Quand cela est possible le processus est très technique et aujourd'hui cela n'a été accompli que trois fois : avec la Lune lors des missions Apollo, avec la mission Stardust qui a pu rapporter des grains de la comète Wild 2 et avec la mission Hayabusa qui a rapportée des échantillons de l'astéroïde Itokawa. Si ces retours d'échantillons nous intéressent c'est simplement parce que les instruments à disposition sur Terre sont bien plus puissants et précis, et les conditions d'études mieux maîtrisées que dans l'espace. D'autres missions (Hayabusa 2, OSIRIS-REx) sont actuellement en vol vers des astéroïdes, mais aucun projet concret n'est prévu pour un retour d'échantillon cométaire (bien que ce fût l'objectif initial du projet Rosetta).

S'il est difficile d'aller étudier et de rapporter un morceau de comète, pourquoi ne pas attendre qu'elles nous tombent sur la tête ? C'est un évènement non souhaitable et pourtant chaque année des dizaines de milliers de tonnes de météoroïdes et de poussières interplanétaires finissent leur route sur Terre (Love and Brownlee, 1993). La plupart sont des météorites, c'est à dire des fragments d'astéroïdes, mais d'autres sont des poussières du milieux interplanétaire, terme plus vague désignant une catégorie d'objets dont l'origine n'est pas déterminée précisément mais dont certains ont une nature cométaire. C'est le cas de

certaines particules de poussières interplanétaires (*Interplanetary Dust Particles* – IDPs, Brownlee (1978, 1985)), généralement capturées dans l'atmosphère, mais aussi de micrométéorites (Whipple, 1967) notamment fortement carbonées (*Ultra-Carbonaceous Antarctic Micro-Meteorites* – UCAMMs) récupérées en Antarctique (Thomas et al., 1993; Engrand and Maurette, 1998; Duprat et al., 2007).

2.3.1 La mission Stardust

La mission américaine Stardust avait pour objectif principal de passer dans la queue de la comète Wild 2 en 2004 et d'en capturer des poussières grâce à un piège d'aérogel (voir figure 2.6). Grâce à cette technique, plus de 10 000 particules d'une taille de 1 µm à 300 µm ont pu être récoltées et rapportées sur Terre (Brownlee et al., 2006). Malgré la vitesse importante des impacts dans l'aérogel (dû à la vitesse relative élevée entre la sonde et la comète, d'environ 6 km/s) et l'altération des grains les plus petits (Leroux, 2012) de nombreuses analyses ont pu être menées afin de déterminer la composition élémentaire et isotopique (McKeegan et al., 2006; Flynn et al., 2006), minéralogique Zolensky et al. (2006); Keller et al. (2006); Keller and Messenger (2008) ou encore étudier les matériaux organiques (Sandford et al., 2006). Nombres d'études ont permis de faire des parallèles avec les IDPs ou les UCAMMs, d'avancer sur la question de la composition des comètes, sur leur origine, leur formation et celle de leur constituant. Une revue très complète des différentes études menées à partir des analyses variées des échantillons – qui bénéficient encore aujourd'hui des dernières technologies disponibles (TEM, Nano-SIMS) – a été réalisée par D. Brownlee en 2014 (Brownlee, 2014).

Les grains récoltés par Stardust présentent de nombreuses similarités avec les IDPs et les UCAMMs (voir figures 2.8, 2.9 et Quirico et al. (2005); Engrand et al. (2007); Dobrica et al. (2009); Engrand et al. (2016)), on y retrouve des silicates à la fois cristallins et amorphes (Brownlee et al., 2006; Zolensky et al., 2006), des matériaux organiques ainsi que des sulfures de fer-nickel (voir figure 2.7) que l'on suspecte d'être présent au sein et à la surface des comètes, permettant notamment d'expliquer leur faible albédo Capaccioni et al. (2015); Quirico et al. (2016). L'étude des échantillons de Stardust a plus généralement

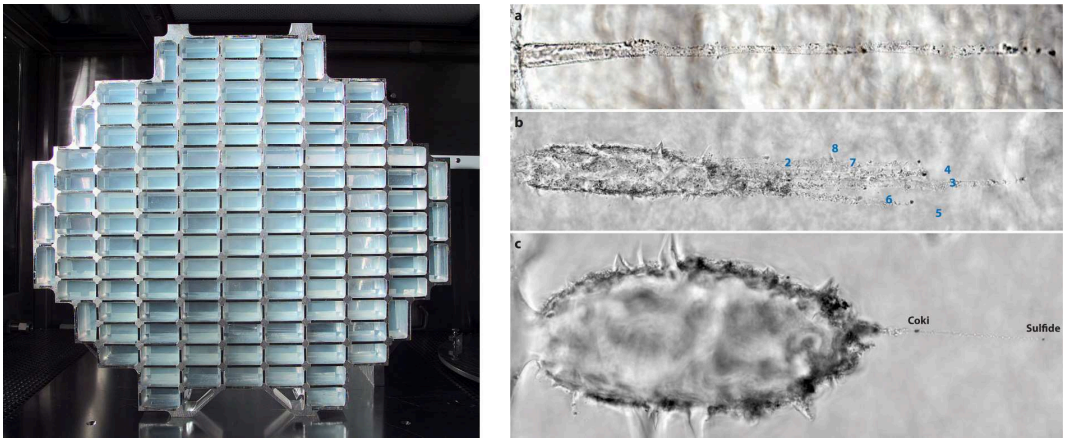


FIGURE 2.6 – A gauche la cible d'aérogel permettant de capturer les grains de la comète Wild 2 (crédits : NASA/JPL/Caltech). Ces grains sont visibles sur la photo de droite (numéroté en bleu photo b – Nakamura-Messenger et al. (2011)) et sur la droite sur les autres photos (a et b – Brownlee (2014)). Noter que la vitesse d'impact très élevée engendre une trainée très longue devant la taille des particules.

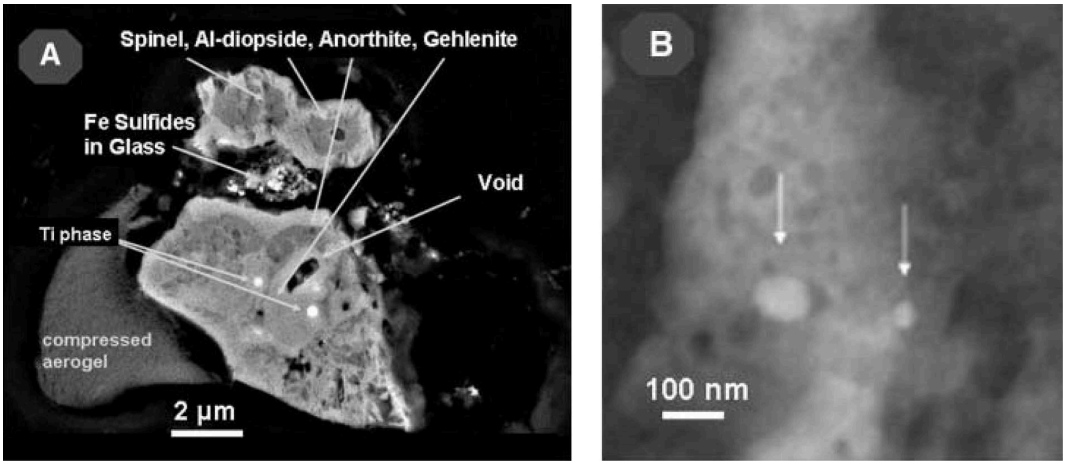


FIGURE 2.7 – Poussière capturées provenant de la queue de la comètes Wild 2 : (A) Image d'un grain similaire à une inclusion de type CAI (inclusion riche en calcium et en aluminium). (B) Grains d'osbornite grains (flèches) dans du spinel. Ces images illustrent la taille micrométrique à nanométrique des grains et inclusions présents dans les poussières cométaires. Issues de Zolensky et al. (2006).

permis d'affiner le scénario de formation des comètes et la dynamique à l'œuvre dans la nébuleuse solaire (voir figure 1.3). Alors que la vision couramment acceptée était celle d'une composition assez proche de grains pré-solaires, sub-micrométrique et couvert d'un manteau de matière organique, il s'avère que le matériel cométaire semble plutôt du même type que celui présent dans les météorites primitives. L'héritage de matière du milieu interstellaire n'est donc pas nul mais assez faible car celle-ci a subi une transformation, notamment par chauffage, expliquant par là même la cohabitation de silicates cristallins et amorphes. Ces interprétations conduisent donc à penser qu'un mélange important a eu lieu dans la nébuleuse solaire, permettant aux comètes d'inclure une diversité importante de matière (Brownlee, 2014).

Bien que la mission Stardust n'ait échantillonné les poussières que d'une seule comète, il semble que son étude et les conclusions qui en sont tirées soient généralisables aux autres comètes (Brownlee, 2014). Ce point de vue peut être appuyé par les études de dynamiques récentes qui expliquent la présence des réservoirs de comètes actuels à partir d'un seul réservoir initial (Brasser and Morbidelli, 2013; Morbidelli, A. and Rickman, H., 2015). De plus, les observations ne mettent pas en évidence des dissimilarités nettes entre les familles de comètes d'un point de vue de leur composition moléculaire et isotopique (A'Hearn et al., 2012; Altwegg et al., 2015). Bien que les poussières de la coma capturée par Stardust n'expriment pas forcément la réalité pleine de la surface du noyau (voir la discussion en section 2.1), il est évident qu'une telle mission permet de réaliser de grandes avancées dans la compréhension de ces corps. La prochaine étape serait de toute évidence le retour d'un échantillon de plusieurs grammes ou plusieurs kilogrammes prélevé directement à la surface et conservé à des températures suffisamment faibles pour préserver les glaces.

2.3.2 Les *Interplanetary Dust Particles* et les *Antarctica Micrometeorites*

Les particules de poussières interplanétaires (IDPs – Brownlee (1985)) et la collection de micrométéorites récoltés dans les neiges de l'Antarctique non loin de la base Concordia (Duprat et al., 2007) sont

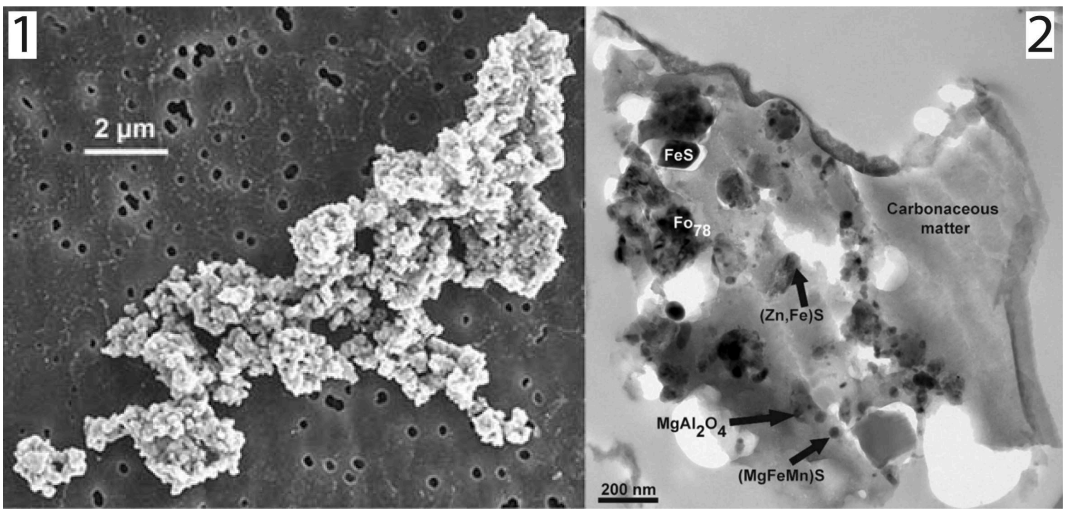


FIGURE 2.8 – Image au microscope électronique à balayage (MEB) d'une IDP (en 1, Bradley et al. (2005)) et au microscope électronique en transmission (MET) d'une UCAMM (Dobrica et al., 2012). Cette dernière montre la présence de nombreux sulfures notamment.

une véritables aubaines pour étudier des analogues d'objets du Système Solaire (voir figures 2.8 et 7.15 page 162). La question est cependant de savoir de quels objets il s'agit. On pense que nombre de ces échantillons sont originaires des comètes. La mission Stardust a permis de confirmer cela et de nombreuses similitudes ont ainsi été noté entre les deux populations de particules collectées (Dobrica et al., 2009).

Près de la moitié des IDPs (de type CP-IDPs pour *chondritic porous anhydrous particles*) proviendraient des comètes. Leurs tailles varient de quelques microns à quelques dizaines de microns et sont composés de 5 à 45% en masse de matière organique, de silicates cristallins (olivines et pyroxènes riches en magnésium), de sulfures de fer-nickel (plutôt pauvre en nickel) et de phase sub-micrométrique appelées GEMS pour *Glass with embedded metals and sulphides* – c'est à dire d'objets consistant en une matrice de verre avec des inclusions de sulfures de fer et de métaux (Engrand et al., 2016). L'origine de ces GEMS est débattu mais semble primitive, typiquement datant de la nébuleuse solaire, notamment en raison de la présence de silicates présolaires (Busemann et al., 2009). L'intérêt ici est qu'ils ont été retrouvés, comme les silicates et les sulfures de fer, dans les grains de la comète Wild 2 (voir figure 2.9).

Les UCAMMs représentent une fraction des micrométéorites récoltés à la surface de la Terre. La plupart le sont aujourd''hui en Antarctique où les couches de neiges datant de quelques décennies sont pures car non contaminées par la présence de l'Homme sur place. Les UCAMMs ont donc une place à part dans cette vaste variété de poussières arrivant sur Terre car elle sont pauvres en minéraux et riche en carbone, assimilé même aux particules de type CHON (Lawler and Brownlee, 1992; Engrand et al., 2016). Tout comme les IDPs, les UCAMMs ont probablement une origine primitive (Engrand et al. (2016) et ses références). La matière carbonée dont elles sont composée, de type poly-aromatique désordonnée semble également proche de ce que l'on trouve à la surface de 67P par exemple (Quirico et al., 2016). D'un point de vue minéralogique les UCAMMs et les IDPs partage la même composition (olivines et pyroxènes magnésien, sulfures de fer et GEMS) malgré quelques disparités (Dobrica et al., 2012).

De nombreuses études se sont récemment focalisées sur les IDPs et les UCAMMs (voir notamment Brad-

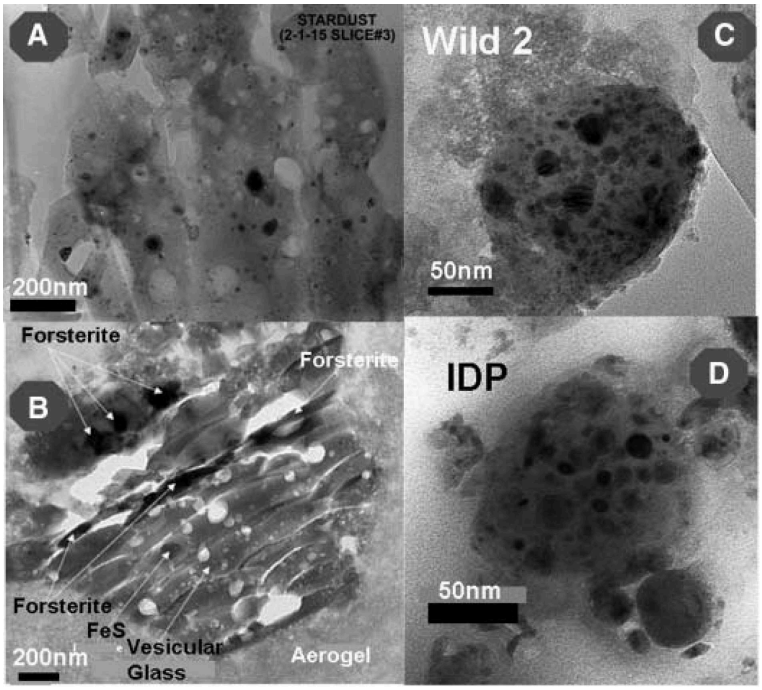


FIGURE 2.9 – Images TEM de grains de la comète Wild 2 en A, B et C. (A) : des silicates, des alliages fer-nickel et des sulfures de fer-nickel sont visibles en noir et gris foncé au sein de l'aérogel. (B) : Grains d'olivines (forstérite) et de sulfures de fer entourés d'aérogel. (C) : Particules proches des GEMS. Les inclusions noirs sont principalement des sulfures de fer et des métaux/alliages fer-nickel. (D) : GEMS provenant d'une IDP. Les inclusions noires sont majoritairement des métaux, alliages et sulfures de fer-nickel et/ou des silicates ferromagnésien. Issue de Zolensky et al. (2006).

ley et al. (2005); Hanner and Bradley (2004); Busemann et al. (2009); Dobrica et al. (2012); Engrand et al. (2016)), les analogies avec les particules de la comètes Wild 2 rapportées par la sonde Stardust (Dobrica et al., 2009) ont renforcées le fait que celles-ci sont d'origines cométaires. À l'instar des météorites qui sont étudiées comme « morceaux » d'astéroïdes, il est donc essentiel de se concentrer sur les propriétés des IDPs et des UCAMMs afin de mettre en évidence les similarités ou les différences entre elles et les comètes. Leur petite taille rend difficile leur récolte mais leur permet aussi de ne pas subir les fortes dégradations provoqués par la rentrée atmosphériques. Qui plus est, les instruments disponibles aujourd'hui permettent de mener à bien des études très précises sur des échantillons de quelques dizaines de nanomètres tout au plus.

Chapitre 3

La mission Rosetta et son périple avec la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko

Le projet Rosetta a une longue histoire et comme toutes les missions spatiales il est fort intéressant d'écouter les nombreux témoignages et anecdotes à son sujet ! La mission fût pensée dans les années 80 par l'ESA après le succès de la mission Giotto et dans le cadre de la définition par l'agence de son programme d'exploration spatiale *Horizon 2000*. Rosetta fait ainsi partie de quatre missions importantes, dites pierres angulaires, dont les lancements sont prévus pour le début des années 2000. L'objectif est alors d'aller rencontrer une comète, de se poser sur le noyau et d'en rapporter un échantillon. Pour des raisons de coûts il n'est cependant pas envisageable de le faire seul : un projet commun avec la NASA est alors étudié. Ce dernier tombe malheureusement à l'eau pour causes politiques et financières mais l'ESA poursuit le développement d'une mission moins ambitieuse, sans retour d'échantillons. Ce sont d'abord deux, puis un seul atterrisseur qui sera embarqué sur la sonde pour se poser sur la comète. Acceptée en 1993, développée et construite dans les années suivantes, la sonde Rosetta est prévue au lancement pour 2003 pour rejoindre sa destination...mais laquelle ?

3.1 67P/Churyumov-Gerasimenko : cible de la mission Rosetta

67P/Churyumov-Gerasimenko : une cible de choix ? En réalité, Rosetta avait pour destination la comète 46P/Wirtnanen à l'origine. Le programme des fusées Ariane ayant cependant subit un report de lancement, il s'est avéré impossible de réaliser le rendez-vous entre Rosetta et 46P comme c'était initialement prévue. 67P sera alors désignée et c'est après un voyage de 10 ans et le survol de deux astéroïdes, Steins et Lutetia, que la sonde arrive à destination.Étant donné que les noyaux de comètes sont de l'ordre du kilomètre, ils sont difficilement voire non observables depuis la Terre. C'est donc seulement à partir du rendez-vous entre la sonde et 67P que celui-ci a pu être caractérisé. Rapidement sa surface a été cartographiée, sa température évaluée, les premières mesures relatives aux gaz et à la poussière ont été faites et les estimations de la masse, du volume et de la densité du noyau ont été réalisées. La figure 3.2 donne

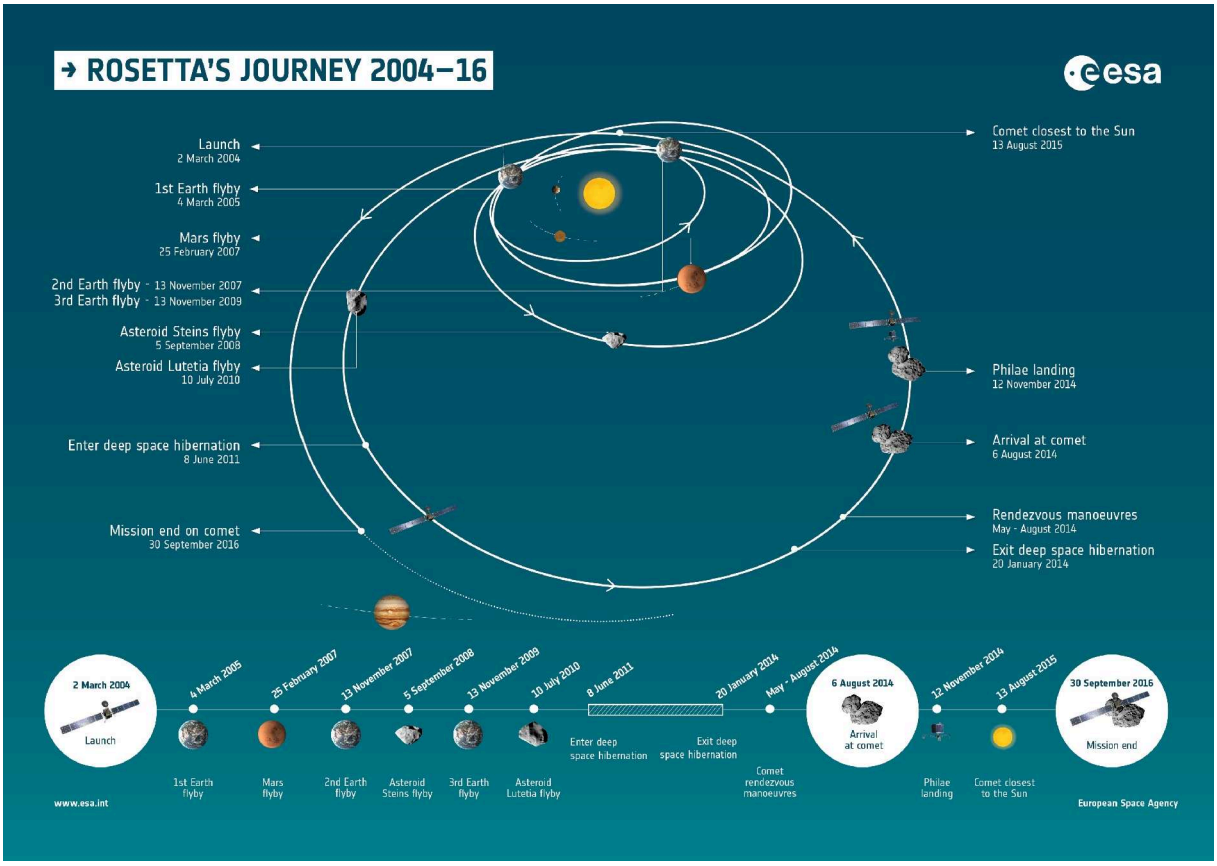


FIGURE 3.1 – Dates clés de la mission Rosetta. Crédit : ESA

un aperçu des caractéristiques principales de la comète à partir des données acquises de août à décembre 2014 environ, lors du début de la mission, tandis que la figure 3.1 donne les dates clés de la mission entière.

La comète 67P appartient à la famille de Jupiter avec un aphélie d'environ 5.6 UA et un périhélie de 1.2 UA lors son dernier passage le 14 août 2015. Elle possède une orbite inclinée de 7° par rapport à l'écliptique et d'excentricité 0.64. C'est une comète jeune dynamiquement comme le montre l'étude de Maquet (2015). En effet, sa proximité avec Jupiter lors de son aphélie influe son orbite. Bien qu'elle fût déjà chaotique avant, son orbite a été modifiée à deux reprises lors de passages à moins de 1 UA de Jupiter, en octobre 1923 et février 1959 (Maquet, 2015). Ce dernier passage ramenant son périhélie de 2.7 UA à 1.3 UA environ (Maquet, 2015). Cela signifie notamment que l'activité de 67P a crûe récemment du fait de cette modification orbitale.

3.2 Objectifs scientifiques et instruments

3.2.1 Grandes lignes

Une comète est un objet dynamique en raison de son activité. De même qu'il est intéressant de suivre l'évolution des saisons sur un corps possédant une atmosphère, suivre une comète dans le temps est

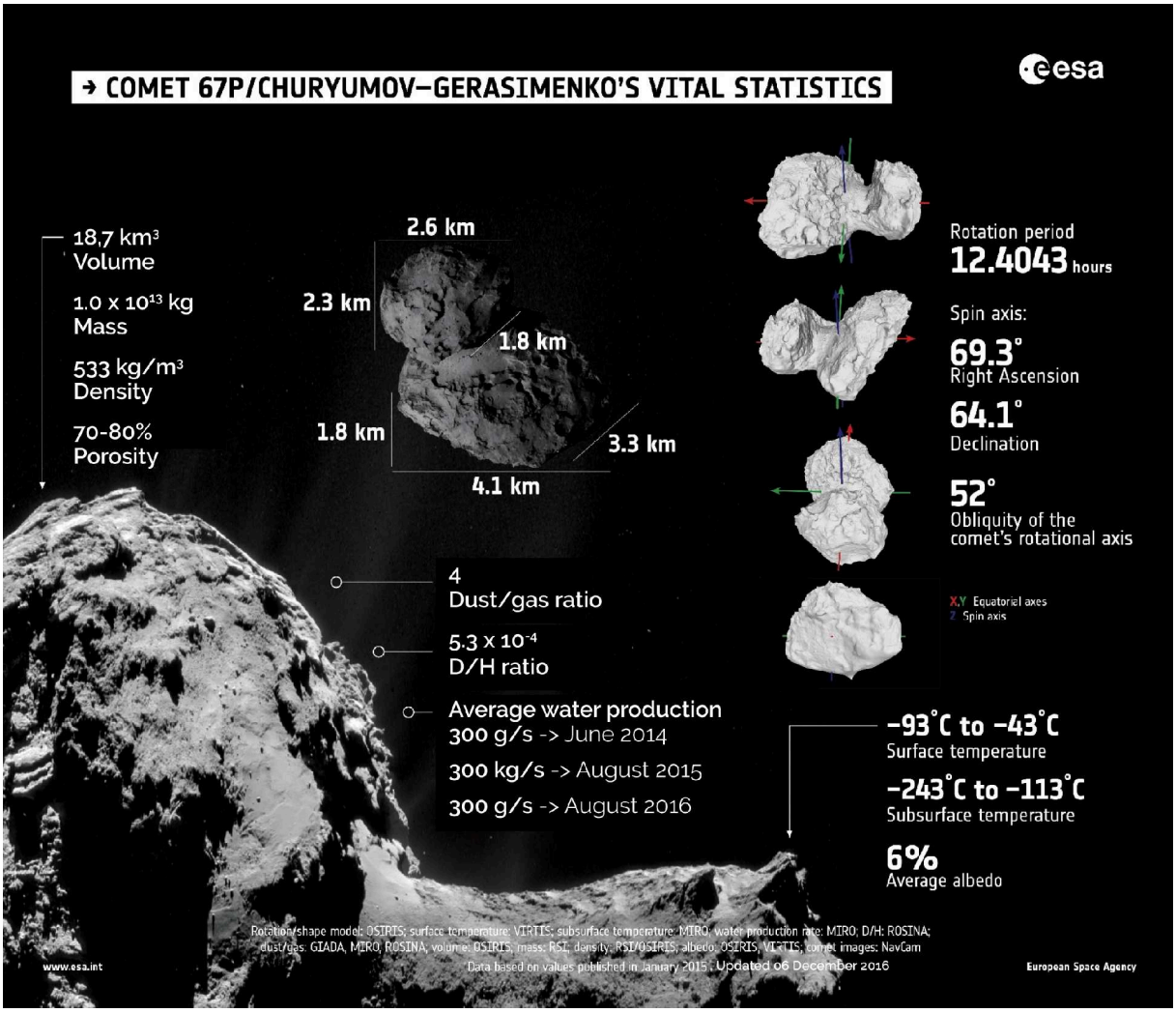


FIGURE 3.2 – Les principales caractéristiques de 67P/Chruryumov-Gerasimenko d'après les données disponibles durant les premiers mois de la mission. Crédits : ESA (adapté).

indispensable pour mieux comprendre les mécanismes qui régissent cette activité et de manière générale l'évolution de ces objets. Accompagner une comète sur son orbite permet également de multiplier les mesures (que ce soit des gaz, des poussières ou de la surface) et d'établir des liens entre elles. Enfin, grâce à un atterrisseur il devient possible d'obtenir des informations directement sur la surface du noyau comme jamais il n'a été possible de le faire avec des missions survolant simplement le noyau cométaire, souvent à plusieurs centaines de kilomètres. Tout ça justifie une mission comme Rosetta qui adopte un plan de vol rapproché et un suivi sur le long terme, pendant presque la moitié de la période orbitale de 67P.

De nombreuses questions portant sur les comètes restaient sans réponses avant la mission Rosetta. On pourra par exemple trouver à ce sujet les articles de revues de Glassmeier et al. (2007); Altwegg (2008); Meech (2017). Après les missions américaines Deep Space 1, Stardust, Deep impact et EPOXI la sonde Rosetta était donc attendue afin de réaliser des mesures plus précises et plus fournies sur un nouveau noyau cométaire. La question du rapport des quantités poussières/glaces intéresse ainsi énormément la communauté car elle permet de mieux cerner la composition et l'activité de la comète ; elle interroge aussi

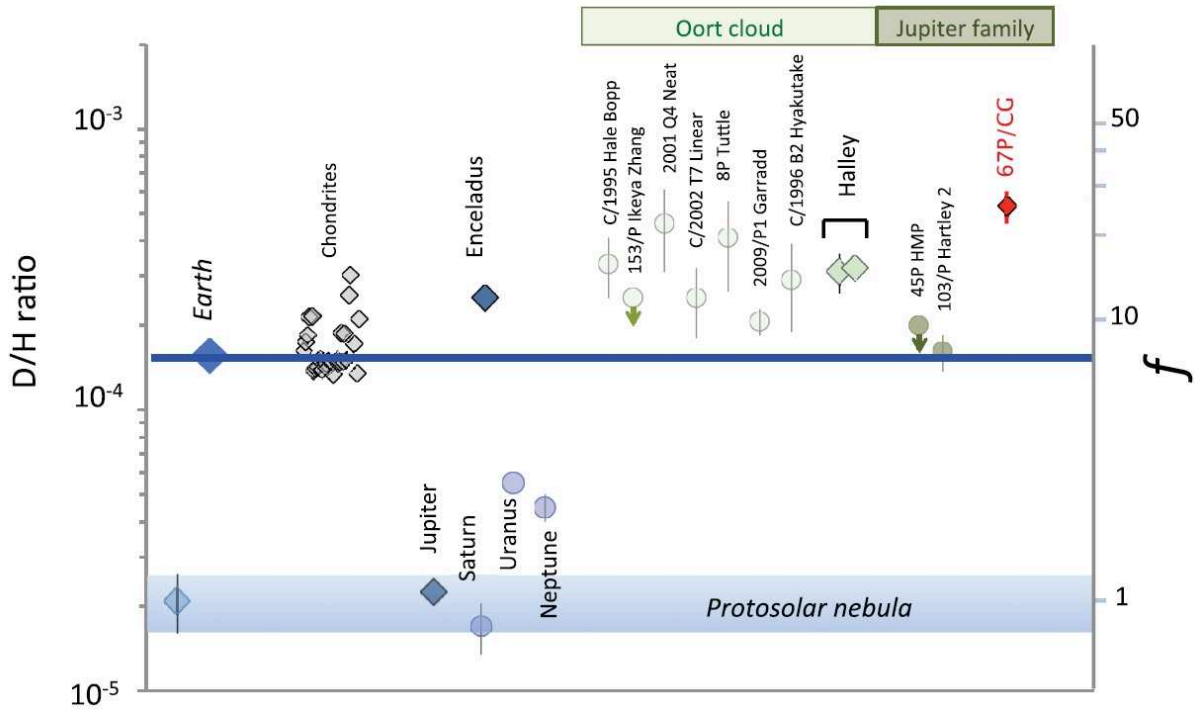


FIGURE 3.3 – Le rapport D/H de plusieurs corps du Système Solaire. D'après Altwegg et al. (2015).

sur les conditions de formations de ces objets et plus généralement sur celle des objets de Kuiper (Fulle et al., 2017). L'étude des volatils est un enjeu très important aussi puisqu'ils sont à la fois les principaux acteurs de l'activité pour certains et très intéressant car potentiellement primitifs pour d'autre (comme l'oxygène moléculaire – Bieler et al. (2015); Mousis et al. (2016); Taquet et al. (2016)). Étudier les espèces présentes dans la coma ou à la surface peut aussi permettre de détecter des molécules complexes dont les acides aminées ou les sucres (Biver et al., 2015; Altwegg et al., 2016) pouvant nous intéresser en raison du lien avec la chimie complexe liée à la vie terrestre. Les gaz rares sont aussi des éléments intéressant car présents dans l'atmosphère terrestre et partiellement d'origine cométaire, comme le xénon (Marty et al., 2017).

Une des grandes questions concerne l'eau de nos océans. D'où vient-elle ? Quelle famille d'objet l'a apporté sur la Terre primitive et dans quelles proportions ? Les comètes ont été longtemps mises sur le devant de la scène mais les mesures de rapports isotopiques D/H semble favoriser certaines familles d'astéroïdes primitifs. De plus, avec les mesures déjà réalisées sur d'autres comètes et celle récemment faite sur 67P, cet indicateur montre que la famille de comètes de Jupiter n'est pas homogène. Certaines d'entre elles présentant un rapport D/H important ou comparable aux comètes du nuage de Oort comme 67P et d'autres plus proche de celui de la Terre comme la comète 103P/Hartley 2. Bien que la question ne soit pas close, la mission Rosetta et l'instrument ROSINA permettent de répondre à ce genre d'interrogations (voir figure 3.3 et Altwegg et al. (2015)).

L'idée d'un noyau fait principalement de glace impliquait une surface majoritairement recouverte de glace dans le modèle de Whipple. Jusqu'à ce que l'on survole 1P/Halley et un noyau actif sur environ 10% de sa surface totale. Les autres noyaux cométaires n'ont fait que confirmer cela, la glace, si elle est présente en surface, ne semble pas stable et s'observe de manière localisée. Un noyau semble donc

avant tout recouvert d'une couche de poussières, d'une croûte de matériaux réfractaires. Est-ce le cas de toutes les comètes, peut-on espérer observer plus de glace sur une comète qui n'a pas entamé sa période d'activité ? Va-t-on en voir être mise à nue à l'approche du périhélie par le jeu de modification de la surface ? Rosetta permet à nouveau d'éclaircir ces questions et de tester à nouveau les idées en vigueur à l'aube d'une grande mission comme celle-ci.

La composition des composés réfractaires d'un noyau cométaire est encore à l'heure actuelle un sujet sur lequel il est difficile de se prononcer avec certitudes. On a identifié depuis les missions Giotto et Véga les fameux composés organiques appelés CHON (Kissel and Krueger, 1987a,b; Jessberger et al., 1988; Fomenkova et al., 1994), du nom des éléments majoritaires qui les composent. On sait également que les silicates sont présents, notamment sous forme amorphe et cristalline (Crovisier et al., 1997; Hanner, 1999; Brownlee et al., 2006; Zolensky et al., 2006). On aimerait cependant identifier clairement les espèces présentes à la surface, même si la mission Stardust a permis de grandes avancées dans ce domaine (Brownlee, 2014).

Déterminer la quantité de glace présente dans les grains capturés dans la coma, étudier leur structure, leur morphologie, leur taille ou encore leur porosité est également très important et est un des objectifs de Rosetta. Cela permet, avec le suivie de l'activité, d'affiner les modèles l'expliquant et de comprendre les mécanismes qui conduisent à la sublimation des volatils, à leur éjection dans la coma ou encore d'identifier leur source et leur lien avec la surface alors qu'une grande partie de celle-ci n'est pas active. Comment expliquer également les *outbursts*, ces épisodes très brutaux d'éjection de gaz et de poussières pouvant intervenir même à grande distance héliocentrique ?

Toutes ces questions font parties d'une longue liste que Rosetta a effectivement permis d'investiguer. Répondant à nombres d'entre elles et soulevant également de nouvelles interrogations ou laissant certaines d'entre elles sans réponses définitives jusqu'à aujourd'hui (on sait encore peu de chose sur la structure interne par exemple).

3.2.2 Instruments

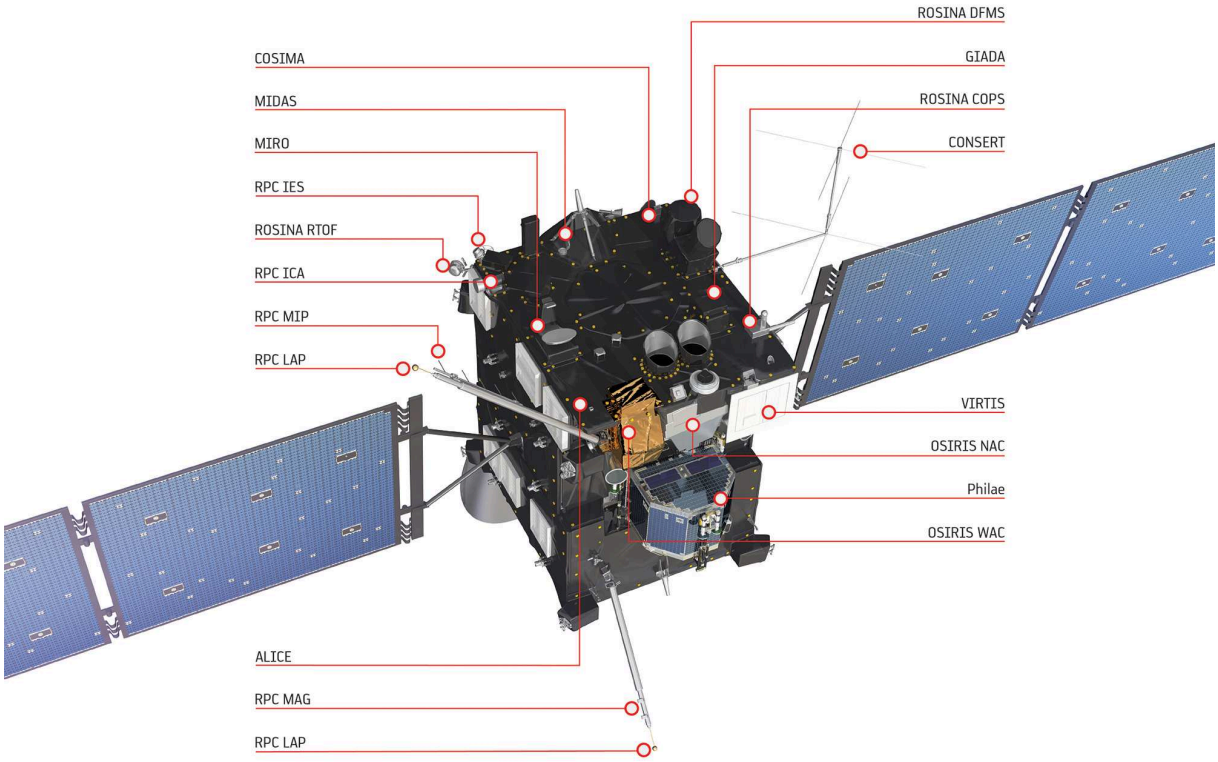
Rosetta et Philae sont équipés de 11 et 10 instruments respectivement. Le nom, le type et la fonction principale de chacun est résumé dans les tableaux 3.1 et 3.2.

Instruments	Type	Fonction
ALICE	Spectromètre UV	Permet d'analyser les gaz de la coma et de la queue (H_2O, CO_2, CO) ainsi que le noyau dans une moindre mesure.
CONSERT	Sondeur par ondes radio	Analyse de la structure interne du noyau en y étudiant la propagation des ondes radio (nécessite le récepteur sur Philae).
COSIMA	Analyseur de poussière par spectrométrie de masse	Capture sur des plaques les poussières de la coma puis les étudie au microscope et avec un faisceau d'ions.
GIADA	Analyseur de poussière	Étudie le flux, la vitesse d'approche, le moment et la taille des particules de poussières de la coma.
MIDAS	Analyseur de poussière par microscopie	Capture et étudie par microscopie les petites particules présentes dans la coma
MIRO	Radiotélescope en sub-millimétrique et millimétrique	Permet de caractériser les taux de production des espèces majeures (coma et noyau) et de déterminer la température de la surface.
OSIRIS	Caméra visible haute résolution multi-spectrale	Fournie des images très haute résolution de la surface (éventuellement des grains dans la coma), 11 filtres disponibles et deux champs (larges et étroits).
ROSINA	Spectromètre	Analyse des ions et des espèces neutres dans la coma.
RPC	Suite de senseurs pour l'étude des plasmas	Se concentre sur les propriétés du noyau et son interaction avec le vent solaire
RSI	Étude du signal envoyé par la sonde	Permet de déterminer la masse et la gravité de la comète (donc densité et structure interne). Étude de la coma interne et aide pour la définition des trajectoires.
VIRTIS	Image hyperspectrale et spectromètre haute résolution visible et infrarouge	Permet d'étudier les propriétés de surface : température, composition, présence de glace, propriétés photométriques. Voir 4.

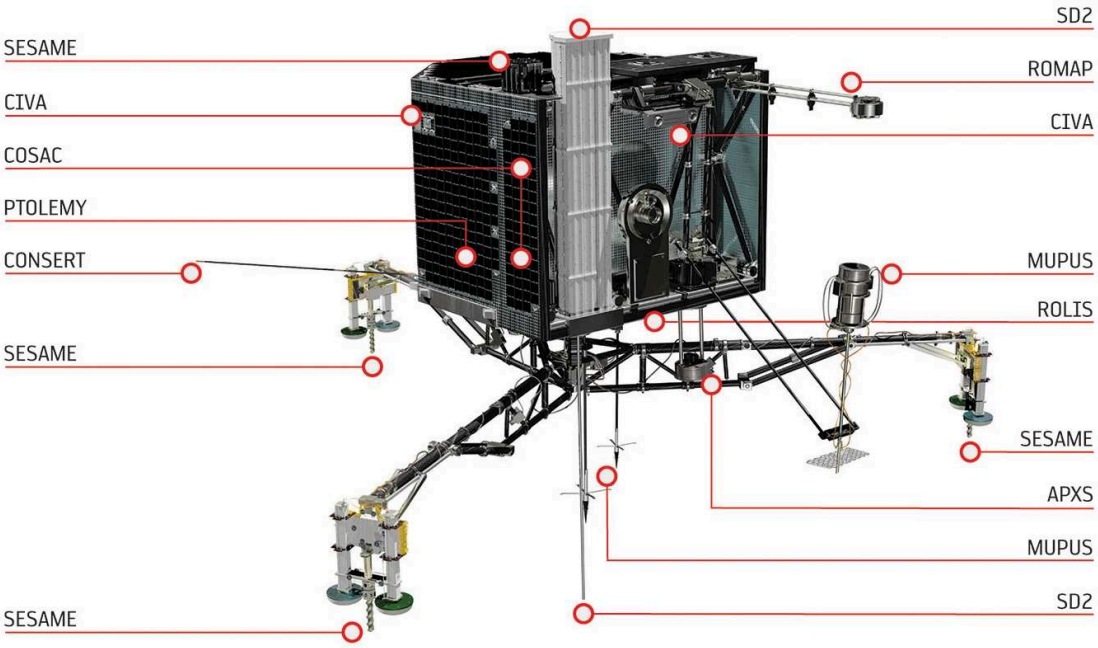
TABLE 3.1 – Résumé des instruments de Rosetta.

Instruments	Type	Fonction
APXS	Spectromètre X	Détection des particules alphas et des rayons X, (informations sur la composition élémentaire).
CIVA	Caméra panoramique visible	6 micro-caméras permettant une étude de l'environnement de Philae.
CONSERT	Récepteur de CONSERT	Marche de concert avec l'instrument de Rosetta.
COSAC	Analyseur de gaz	Détection et analyse des molécules organiques.
PTOLEMY	Analyseur de gaz	Étude des rapport isotopiques des espèces légères.
MUPUS	Senseurs multi-usage pour la surface	Étude de la densité et des propriétés thermiques et mécaniques de la surface grâce aux outils d'ancrage.
ROLIS	Caméra visible	Capteur CCD permettant d'imager la surface à haute résolution lors de la descente.
ROMAP	Magnétomètre et étude des plasmas	Étude du champ magnétique local et de l'interaction entre la comète et le vent solaire.
SD2	Foreuse et microscope	Permet de forer à plus de 20 cm et d'analyser les échantillons au microscope.
SESAME	Sondage électrique et acoustique	Trois instruments mesurant : la permittivité (PP), la propagation des ondes acoustiques (CASSE) et les poussières retombant à la surface (DIM).

TABLE 3.2 – Résumé des instruments de Philae.



(a) Représentation schématique de Rosetta et ses instruments. Crédit : ESA



(b) Représentation schématique de Philae et ses instruments. Crédit : ESA

FIGURE 3.4 – Rosetta et Philae

3.3 Quelques résultats relatifs au noyau de 67P

Résumer l'ensemble des résultats de la mission Rosetta serait une tâche complexe et sort du cadre de ce manuscrit. Le lecteur est pour cela renvoyé selon ses intérêts vers la littérature fournie qu'a donnée la mission Rosetta. On rapportera dans cette section quelques résultats intéressant pour cette étude car concernant la surface de 67P.

Le rendez-vous entre Rosetta et 67P a eu lieu autour de 3.5 UA (voir figure 3.1 pour les dates clés de la mission). Sachant que la sublimation de la glace d'eau, principale espèce volatile, commence à partir de 200 K environ et donc à une distance du Soleil autour de 2.5 UA, cela a permis à la sonde d'étudier l'augmentation de son activité avec son approche au périhélie (qui a eu lieu à la mi-août 2015) puis sa décroissance (voir figure 3.5). Surtout, en raison de la faible activité en début de mission et dans le but d'effectuer une cartographie et une reconnaissance des terrains pouvant accueillir Philae, la sonde a pu se maintenir à une distance de seulement quelques kilomètres à quelques dizaines de kilomètres pendant plusieurs mois.

La caméra haute résolution OSIRIS a pu ainsi cartographier une grande partie du noyau, principalement l'hémisphère Nord puisque l'hémisphère Sud était alors plongé dans la nuit polaire. En estimant la forme du noyau, des estimations de masse et de densité ont pu être réalisé de même qu'une revue des principales caractéristiques présentes à la surface (Sierks et al., 2015; Thomas et al., 2015). Le phénomène

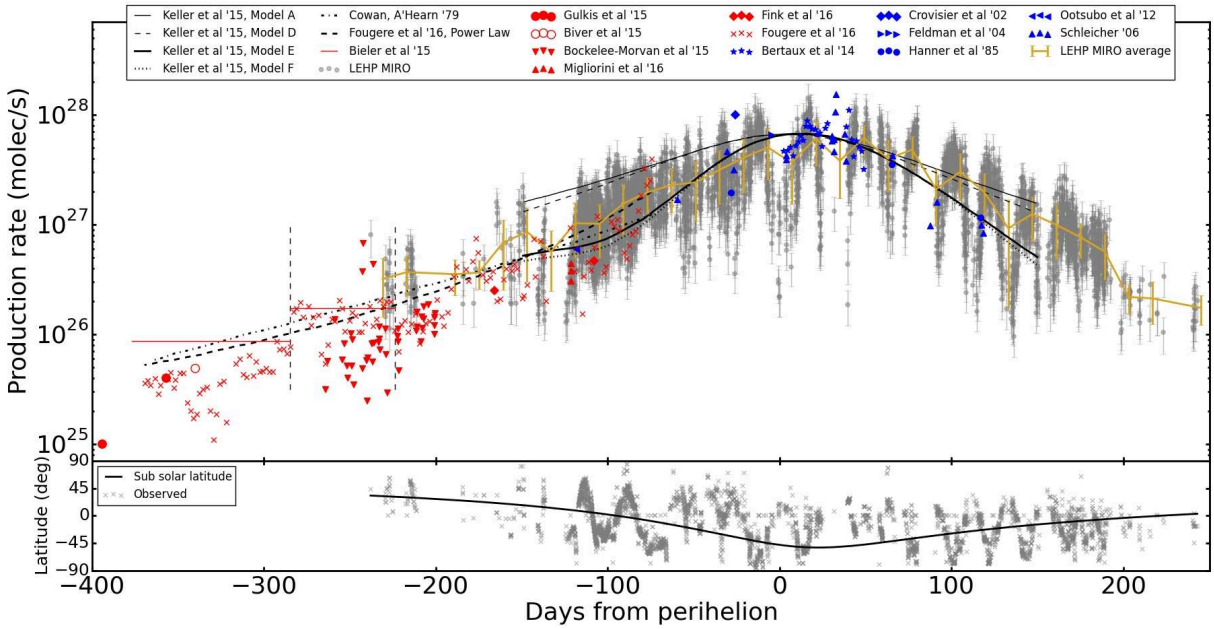


FIGURE 3.5 – Figure issue de Marshall et al. (2017) donnant le taux de production en eau calculé grâce aux données de MIRO. Le taux de production est à son maximum environ 1 mois après le passage au périhélie. En début de mission, le taux de production est encore relativement faible, traduisant une activité également faible, et permettant à Rosetta de se maintenir à faible distance du noyau.

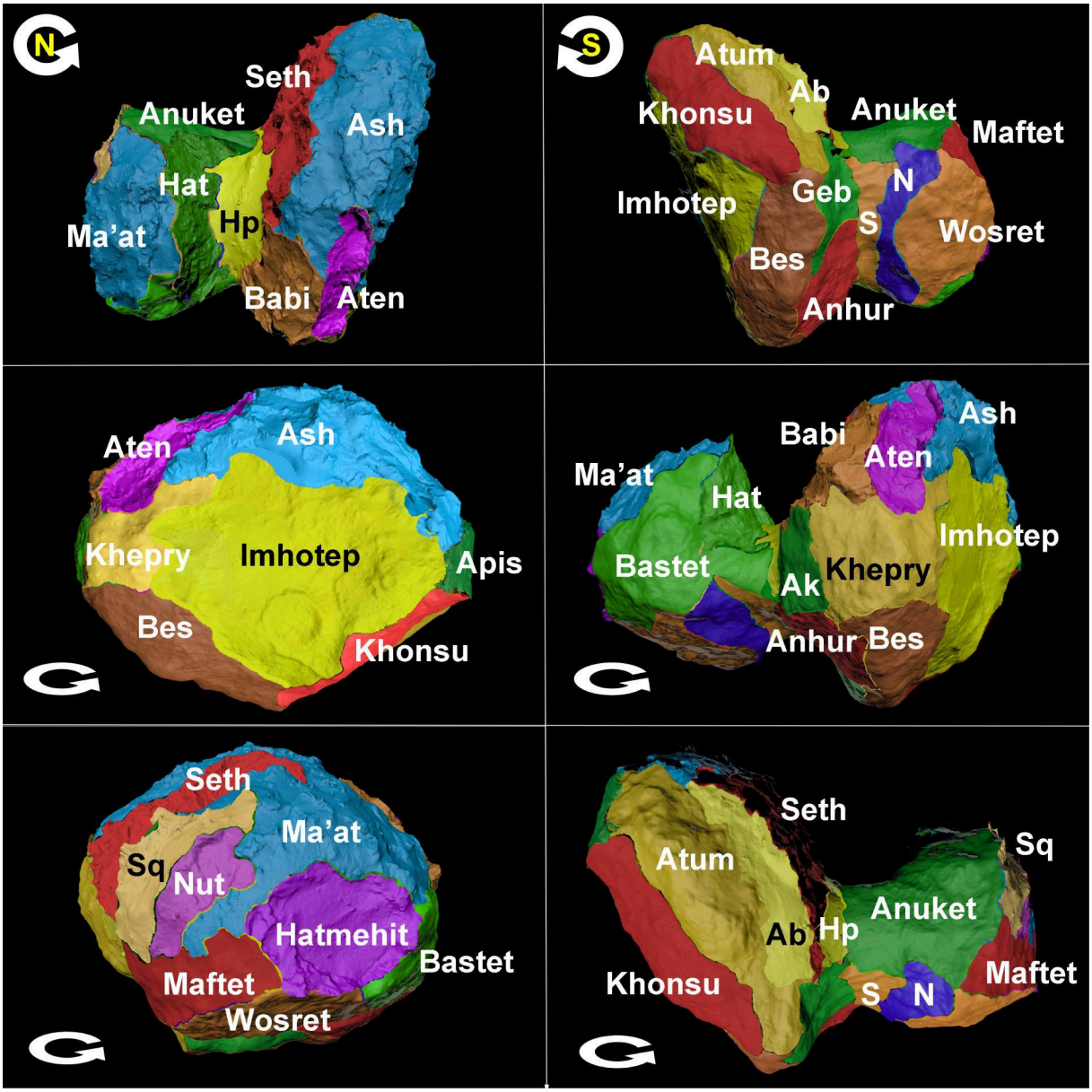


FIGURE 3.6 – Cartographie en différentes régions de la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko, basée sur des critères géomorphologiques. Tiré de El-Maarry et al. (2017).

de redéposition des poussières préférentiellement sur certains terrains dont l'aspect est lisse a été mis en évidence (Thomas, N. et al., 2015) de même que les mécanismes à l'origine de régions particulières comme Imhotep (Auger et al., 2015), susceptible de connaître une érosion en périphérie qui conduirait à la formation des terrains lisses en son centre (pour une photo de cette région, voir figure 5.32 page 113). Le taux d'érosion engendré par l'activité a été calculé notamment par **?** et **?** et peut atteindre plusieurs mètres selon les régions.

La densité et la masse ont été affinées lorsque la forme complète du noyau a été obtenue (Pätzold et al., 2016). L'atterrissage de Philae ainsi que les études menées grâce aux données OSIRIS mettent en avant des terrains très variés : érodés par l'activité, fortement craquelés et fracturés lorsque la roche est à nu mais aussi parfois recouvert d'un manteau de poussière et d'apparence lisse (voir figures 2.5a et 3.7) ;

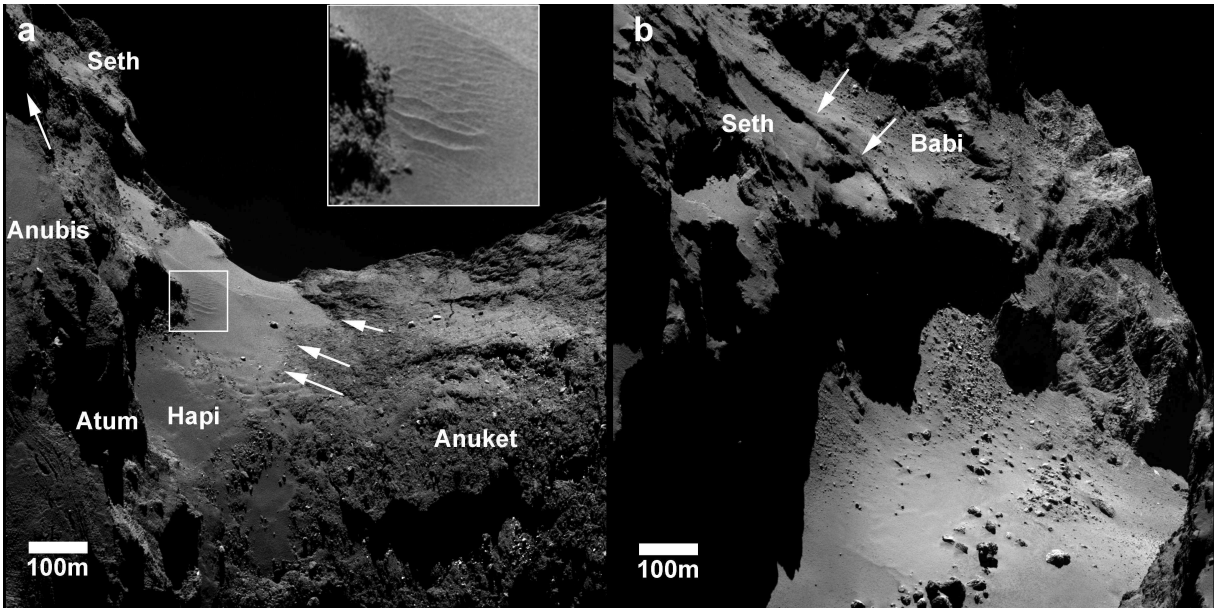


FIGURE 3.7 – Images OSIRIS montrant la diversité des terrains rencontrés à la surface de 67P dans la région du « cou », entre les deux lobes. Les flèches indiquent les frontières des différentes régions. Pour plus de détails, se reporter à El-Maarry, M. R. et al. (2015).

ces derniers terrains exhibant éventuellement des signes de structures éoliennes (Poulet et al., 2016; El-Maarry et al., 2015; Mottola et al., 2015; Pajola et al., 2016; Jia et al., 2017). Un découpage en région a été également produit d'abord pour l'hémisphère Nord (Thomas et al. (2015); El-Maarry, M. R. et al. (2015)) puis pour l'hémisphère Sud (El-Maarry et al., 2016, 2017) ; plus récemment, Birch et al. (2017) a également étudié la morphologie de 67P et proposé des mécanismes de formation et d'évolution de certaines structures (dépressions, terrains recouvert de poussières). Les régions de 67P sont établies sur des critères géomorphologiques et non photométriques. Indépendamment de ce découpage en régions, les instruments VIRTIS et OSIRIS ont mis en évidence une surface très homogène du point de vue de la composition, et très sombre (albédo d'environ 6%, Capaccioni et al. (2015); Fornasier et al. (2015); Ciarniello et al. (2015) et voir partie II).

Le spectre de 67P est marqué par cet albédo très sombre, des pentes spectrales rouges et par l'absence de signatures spectrales hormis une bande d'absorption large et centrée à 3.2 µm (voir figure 3.8). Les deux premières caractéristiques peuvent s'expliquer par le matériaux organiques et par la présence de sulfure de fer (Quirico et al. (2016) et voir partie III). Concernant la bande d'absorption à 3.2 µm, il est proposé pour l'instant des groupements $-OH$ dans des acides carboxyliques ainsi que des ions $NH_4{}^+$ (Quirico et al., 2016). Ce dernier composé a par ailleurs été détecté dans la coma par ROSINA (Beth et al., 2016).

Pour autant, malgré l'absence de zones étendues et exposées au Soleil exhibant de la glace comme sur Tempel 1 (Sunshine et al., 2006), on trouve des zones très localisées riches en glace que l'on appelle souvent tâches ou « patchs » (vocabulaire que l'on utilisera par la suite) mais qui contiennent à peine quelques pour cents de glace (Barucci et al., 2016). Ces tâches brillantes réparties de manière disparate sont répertoriées par OSIRIS qui fournit une résolution spatiale plus importante (Pommerol et al., 2015; Barucci et al., 2016; Deshapriya et al., 2016; Oklay et al., 2016a). Les signatures spectrales de la glace

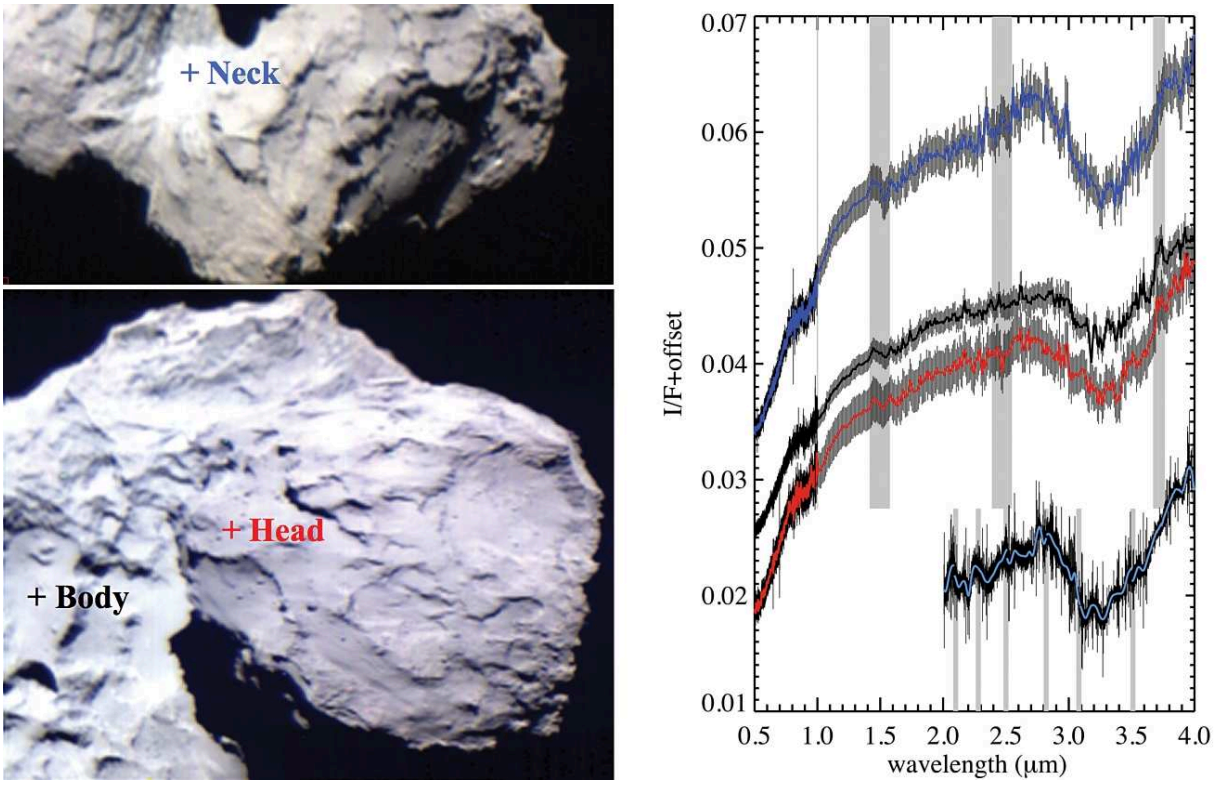


FIGURE 3.8 – Images et spectres VIRTIS issus de Capaccioni et al. (2015).

d'eau ont également été confirmées par VIRTIS (Filacchione et al., 2016b; Barucci et al., 2016; Raponi et al., 2016) ainsi que des zones où les signatures en glace de CO_2 ont été identifiées, mais uniquement à deux reprises dans ce cas (Filacchione et al., 2016c). Ces études montrent que ces patchs de glace peuvent survivre localement pendant des périodes de temps assez longues allant jusqu'à plusieurs mois (Deshapriya et al. (2016) et communication personnelle).

Parallèlement, des études ont permis de suivre l'évolution de la surface en étudiant différents indicateurs spectraux (pente spectrale, profondeur de bande ou centre de la bande – Fornasier et al. (2016); Filacchione et al. (2016a); Ciarniello et al. (2016); Oklay et al. (2016b)). Ces études montrent bien que la glace n'est pas stable à la surface à grande échelle spatiale mais mettent en évidence un cycle saisonnier (Ciarniello et al., 2016; Fornasier et al., 2016) et journalier (De Sanctis et al., 2015; Fornasier et al., 2016) (voir figure 3.9 et De Sanctis et al. (2015); Ciarniello et al. (2016); Fornasier et al. (2016)). En effet, la propagation lente de l'onde de chaleur en profondeur couplée au fait que la surface est froide durant la nuit (car l'inertie thermique est faible) rend possible la condensation de la glace en surface. Lorsque le jour se lève, celle-ci sublime à nouveau, faisant disparaître le givre formé durant la nuit (De Sanctis et al., 2015). C'est ainsi la première fois que l'on peut mettre en évidence un tel cycle journalier. D'où l'intérêt du suivi à long terme d'un noyau cométaire à nouveau.

Ces quelques résultats ne représentent qu'une infime partie des travaux publiés au cours de la mission. Sa durée a permis l'acquisition, par l'ensemble des instruments embarqués sur Rosetta, de jeux de données conséquents, diversifiés d'un point de vue des conditions d'observations et inégalés jusqu'alors pour une mission cométaire. L'analyse des résultats a produit de nombreuses études ayant fait progresser notre compréhension d'un noyau cométaire, de son activité, de son environnement. Cette analyse n'est

cependant pas terminée et nécessite un investissement sur de nombreuses années afin d'en extraire tout l'intérêt, notamment en croisant les données acquises entre les différents instruments.

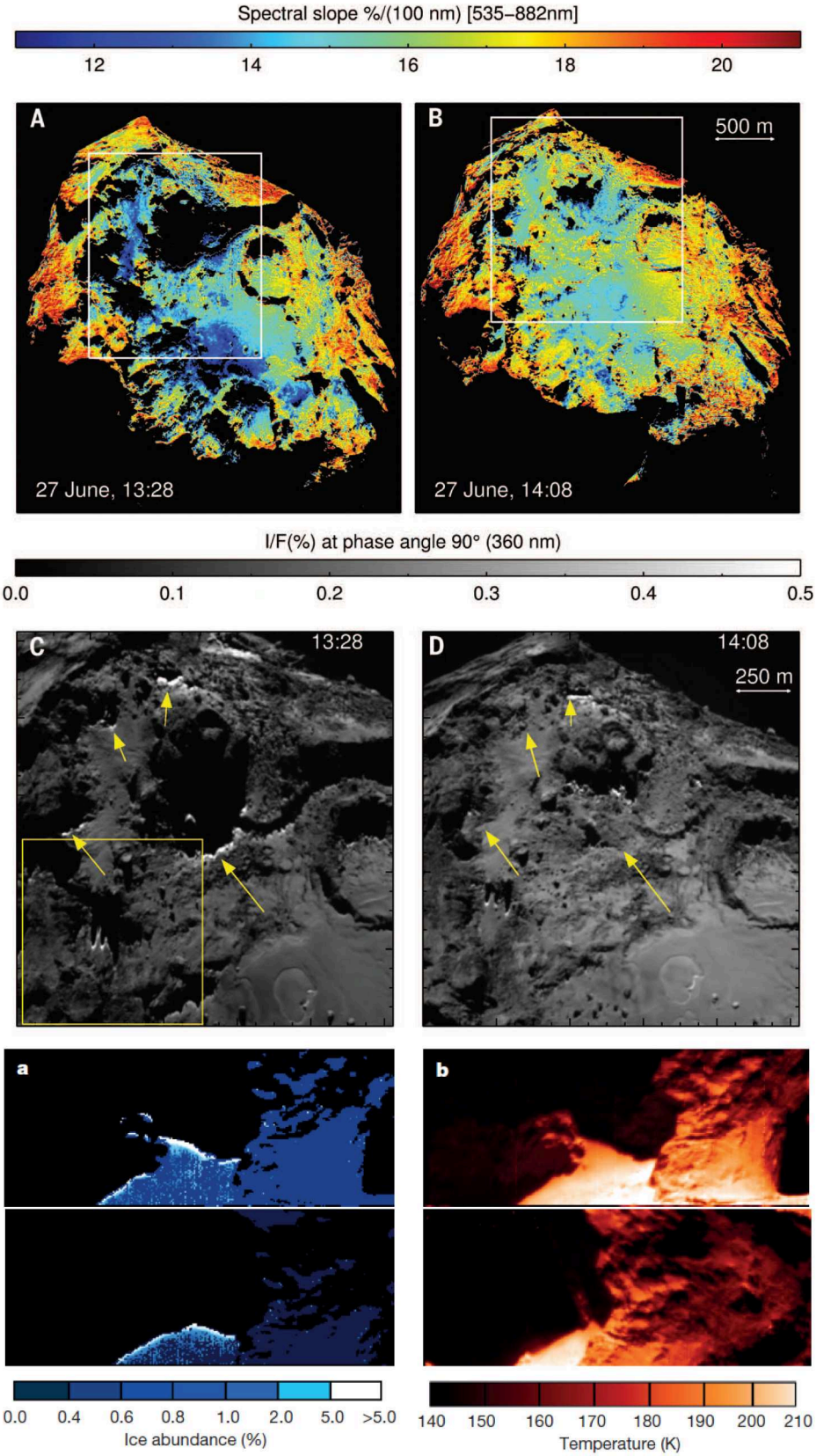
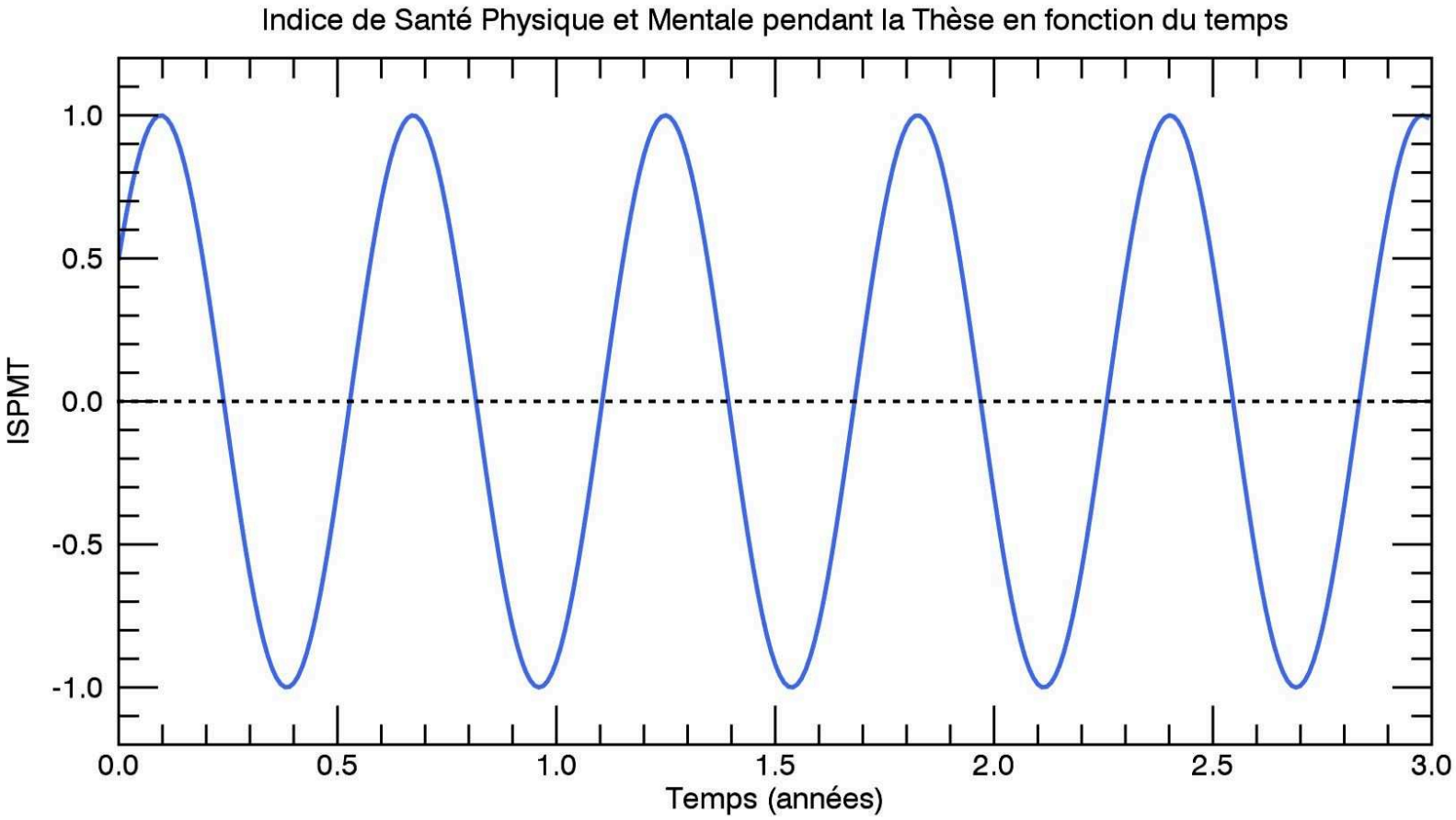


FIGURE 3.9 – Les quatre images du haut sont issues de Fornasier et al. (2016) et illustrent l'augmentation de la pente spectrale à mesure que le jour se lève ainsi que le retrait de patchs brillant, associé à du givre. Les quatre figures du bas sont issues De Sanctis et al. (2015) et montrent également le retrait de givre (abondance en glace d'eau) simultanément à celui de l'ombre.


Indice de Santé Physique et Mentale pendant la Thèse en fonction du temps
ISPMT
1.0
0.5
0.0
-0.5
-1.0
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5
3.0
Temps (années)

Deuxième partie

Analyse des données VIRTIS : étude photométrique et thermique du noyau de 67P/CG

Introduction

La télédétection est un outil pratique en ce sens qu'il nous permet de « garder nos distances » avec l'objet étudié, de ne pas se poser à sa surface. Certes on aime toujours tenter le diable et poser par-ci par-là un petit robot qui ira étudier les cailloux d'un peu plus près. Mais l'avantage du satellite en orbite bardé de tous ses instruments est qu'il va pouvoir nous fournir une vue globale de la surface, permettant de l'étudier selon un contexte à grande échelle voir global pourvu que la cartographie soit complète.

VIRTIS, que j'aborderai plus en détails dans la section 4.2, fait partie de ces instruments de télédétection, préférant observer au télescope plutôt que d'aller casser les cailloux au marteau (on peut aimer faire les deux !). A bord de la sonde Rosetta, cet imageur hyperspectral couvre les domaines du visible et du proche infrarouge, de 0.25 µm à 5.1 µm. C'est dans ce domaine que l'on trouve les signatures spectrales des certaines glaces (eau ou de dioxyde de carbone par exemple) présentes dans les comètes et parfois à leur surface. C'est aussi dans cette gamme que certains minéraux et composés organiques sont identifiables. Enfin, en couvrant les longueurs d'onde du proche infrarouge, VIRTIS est sensible au rayonnement thermique de la comète et nous permet ainsi d'en déduire la température. Pendant deux ans et demi, VIRTIS a observé la surface et la coma de 67P/Churyumov-Gerasimenko. Pendant deux ans et demi il a ainsi acquis un nombre de données important, permettant aujourd'hui d'étudier les deux aspects importants d'une comète. Dans cette étude c'est la surface qui m'intéresse.

Pour connaître ses caractéristiques, plusieurs approches sont possibles. Une étude photométrique et/ou spectrophotométrique de la surface permet de mieux connaître son état et donne des indications sur la nature des matériaux qui la compose. Elle est possible lorsque les observations se font sous de multiples géométries afin de contraindre le mieux possible les modèles utilisés pour déterminer les paramètres qui entrent en jeu. Ces paramètres sont par exemple l'albédo de diffusion simple, qui indique la proportion de lumière réfléchie par la surface ; le paramètre d'asymétrie, propre à la fonction de phase que l'on choisit et qui indique la direction et l'anisotropie de la diffusion de la lumière par le milieu particulaire. D'autres paramètres existent, permettant par exemple de tenir compte des ombres projetés à la surface par le relief. Nous détaillerons les modèles utilisés et leurs paramètres dans les sections 5.2 et 5.3.

Toute étude photométrique reposant sur un modèle, je m'attacherai dans le chapitre 5 à étudier la surface de 67P tout en comparant deux de ces modèles applicables aux surfaces sombres comme celle de 67P. Une étude globale est mené dans un premier temps sur les premiers mois de la mission. C'est à partir

de cette étude que je comparerai les modèles utilisés mais aussi les résultats obtenus à partir des deux voies de l'instrument VIRTIS (VIRTIS-M et VIRTIS-H). Par la suite, je me concentrerai sur la région d'Imhotep afin de déterminer les paramètres photométriques de terrains que l'on peut différencier du point de vue de la morphologie.

Enfin, le chapitre 6 consiste en une étude comparative relative à la dérivation des températures à partir des données des deux voies de VIRTIS. Le but étant de mettre en évidence les écarts potentiels dûs aux méthodes utilisées ou aux instruments eux-mêmes.

Chapitre 4

La spectro-imagerie au service de l'exploration planétaire - L'exemple de VIRTIS à bord de la sonde Rosetta

4.1 Principes de fonctionnement

La plupart des sondes spatiales embarquent aujourd'hui un imageur-spectral visible et infrarouge ainsi qu'une caméra multispectrale haute résolution et fonctionnant dans le visible. L'imagerie spectrale, qui nous intéresse ici, est une méthode de télédétection extrêmement efficace pour l'étude des surfaces ou des atmosphères planétaires. Elle permet de combiner à la fois l'information spatiale qu'une caméra classique peut nous apporter avec une information spectrale fournie habituellement par un spectromètre. Grâce à cette combinaison il est par exemple possible de réaliser des cartes de compositions. Un imageur spectral est constitué d'un système optique (miroir, lentille, collimateur...), d'un système permettant de disperser la lumière (prisme ou réseau) et d'un capteur enregistrant le flux lumineux.

L'imagerie hyperspectrale fournie (voir figure 4.1) une grande résolution spectrale grâce à un échantillonnage donnant accès à plusieurs centaines de longueurs d'onde (ou canaux spectraux), c'est le cas de VIRTIS. Ici, la dispersion de la lumière est réalisée grâce à un prisme et/ou un réseau. Évidemment, plus un spectro-imageur dispose d'une résolution spectrale élevée, plus il sera capable de résoudre des structures fines (bandes d'absorption). Mais la résolution spatiale est aussi un élément important, car il ne sert à rien d'être capable d'identifier un composé spectralement s'il est présent sur une zone non résolue spatialement, auquel cas il serait tout simplement absent du signal. Enfin, le rapport signal sur bruit doit être suffisamment bon pour pouvoir identifier les signatures spectrales. On pourrait imaginer que l'idéal serait d'avoir un imageur hyperspectral avec une résolution spatiale digne des CCD dédiée à l'imagerie et qui possèderait une résolution spectrale très élevée, le tout en transmettant des données peu volumineuses de façon bien optimisée pour pouvoir les transmettre jusqu'à nous sans exiger trop de ressources (énergie, mémoire, temps : ces denrées étant précieuses lors d'une mission spatiale) ; les faits

sont différents puisqu'il n'est pas toujours nécessaire d'avoir des capacités extrêmes. D'une part parce qu'augmenter la résolution spectrale signifie avant tout que l'on perd en signal. D'autres parts parce que les exigences, les coûts et les contraintes liés à une mission spatiale ne vont pas de pair avec une prise de risque sur des technologies peu fiables ou peu matures.

Les modes d'acquisitions varient d'un instrument à l'autre (voir figure 4.2). Les anciennes générations fonctionnent plutôt en mode *whisk-broom* : l'acquisition des données se fait pixel par pixel via un balayage (appelée fauchée) perpendiculaire au déplacement de la sonde assuré par un miroir pivotant. Successivement pour chaque pixel, le système dispersif décompose la lumière sur une barrette de détecteurs, chacun correspondant donc à un élément spectral (appelé spectel).

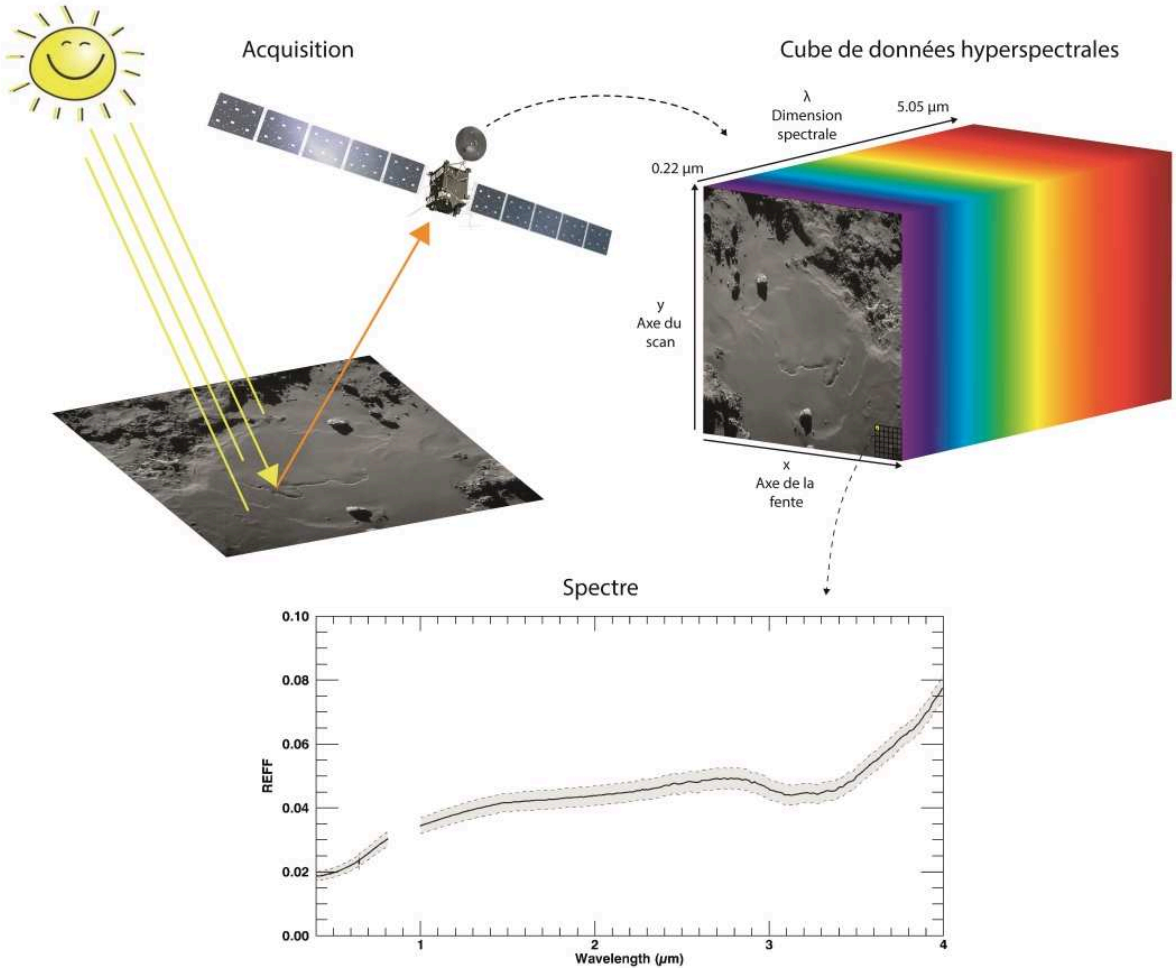


FIGURE 4.1 – Schéma de principe de l'imagerie hyperspectrale. Le spectro-imageur produit un cube de données contenant deux dimensions spatiales et une dimension spectrale. À chaque pixel de l'image correspond un spectre. Le spectre représenté et la gamme de longueurs d'onde est celle de VIRTIS-M. L'image provient de la caméra de navigation de Rosetta.

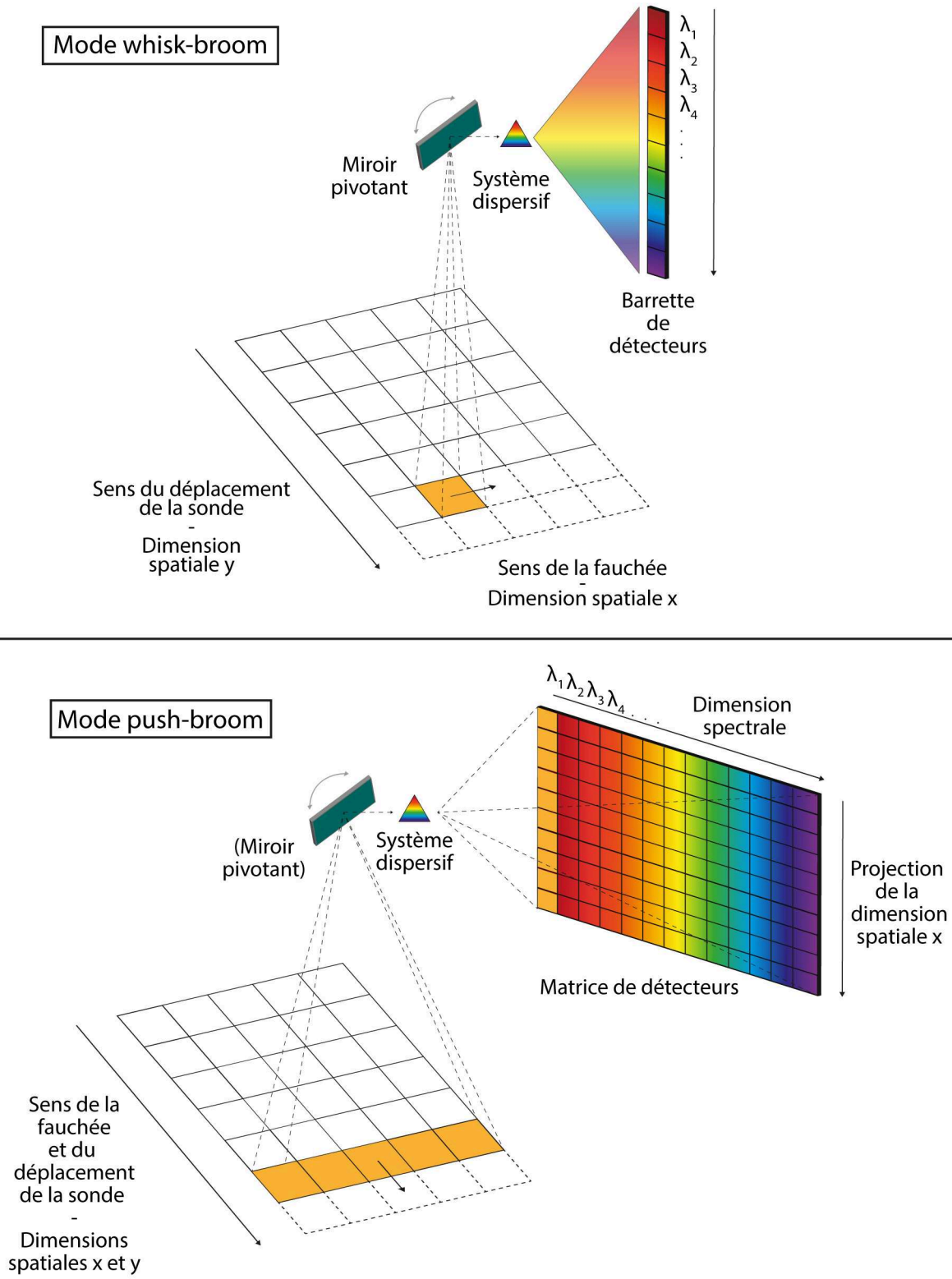


FIGURE 4.2 – Modes de fonctionnement des imageurs hyperspectraux. Les principales différences se trouvent dans la méthode de balayage – perpendiculaire au sens de déplacement de la sonde dans le cas du *whisk-broom* et parallèle pour le *push-broom* bien que le terme de fauchée n'ait plus son utilité – et dans l'utilisation d'une matrice à la place d'une barrette de détecteurs pour ce dernier.

Grâce aux détecteurs 2D, les instruments plus récents fonctionnent en mode *push-broom* : l'acquisition se fait pour une rangée de pixel d'un coup (la lumière rentre dans l'instrument à travers une fente par exemple). Le balayage peut être assuré par le déplacement de la sonde ou grâce au pivotement d'un miroir interne. La lumière de la fente est ensuite dispersée sur une matrice de détecteurs dont une des dimensions correspond à la dimension spatiale parallèle au déplacement de la sonde (x sur la figure 4.2) tandis que l'autre est la dimension spectrale.

Dans les deux cas le cube hyperspectral est construit par accumulation d'un certain nombre d'acquisitions selon l'axe y (figure 4.2). D'après leur fonctionnement on voit que le mode *whisk-broom* nécessite une vitesse d'acquisition plus élevée et un échantillonnage bien calculé tenant compte des deux dimensions spatiales pour éviter le sous- ou le sur-échantillonnage. Cependant, son avantage est que la fonction de transfert reste la même pour chacun des spectres du cube hyperspectral du fait que les spectres sont tous acquis par une seule barrette de détecteurs. Dans le mode *push-broom* la matrice de détecteurs implique une fonction de transfert plus complexe. D'autre complications peuvent également apparaitre (voir le sous-section 4.2.3 pour VIRTIS). En revanche, l'avantage est l'acquisition plus rapide que dans le mode *whisk-broom*.

Les spectro-imageurs ont rapidement pris une place presque indispensable parmi les instruments des missions spatiales. Contrairement à d'autre instruments, un imageur spectral est utile pour tous les types de surfaces (pour les atmosphères on utilise plus souvent un spectromètre classique). Deux raisons principales expliquent cela : la première est que les types de détecteurs utilisés permettent de balayer une gamme spectrale s'étalant du visible au proche infrarouge généralement. Or, c'est dans ces longueurs d'onde que se trouvent les signatures de nombreux minéraux et de glaces, permettant donc la caractérisation d'une surface glacée comme celle d'Europe ou de Pluton tout comme une surface où la présence des minéraux est variée (Mars, Lune, Mercure...). La deuxième raison est que contrairement au spectromètre, l'imageur spectral permet d'obtenir une information spatiale. Ainsi, la caractérisation de minéraux ou de glace au sol est renforcée par une mise en contexte géomorphologique et la cartographie des différentes espèces détectées devient possible, parfois à l'échelle d'une planète entière si la durée de la mission le permet (exemple des olivines sur Mars : Ody (2012)).

Ce type d'étude (cartographie de la distribution d'un élément) relève de la spectroscopie dont quelques grands principes sont évoqués dans les paragraphes suivants. L'imagerie hyperspectrale en plus de per-

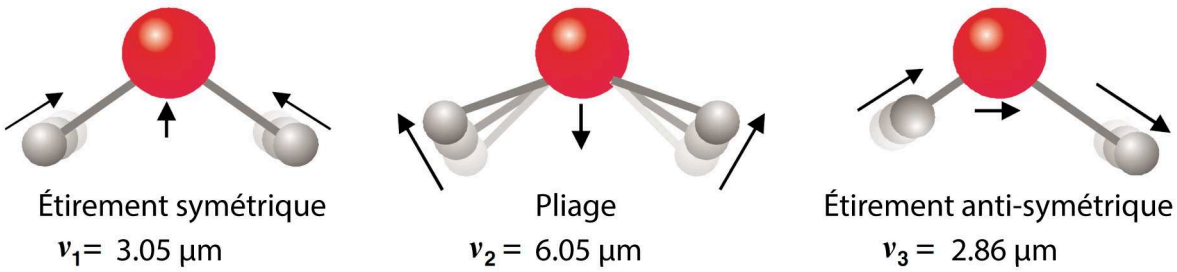


FIGURE 4.3 – Les différents modes de vibrations de la molécule d'eau et la position des bandes d'absorptions correspondant à la fréquence fondamentale. En plus de ces fréquences, il existe des harmoniques créant elles aussi leurs signatures dans le spectre électromagnétique. Adapté de Stomp et al. (2007).

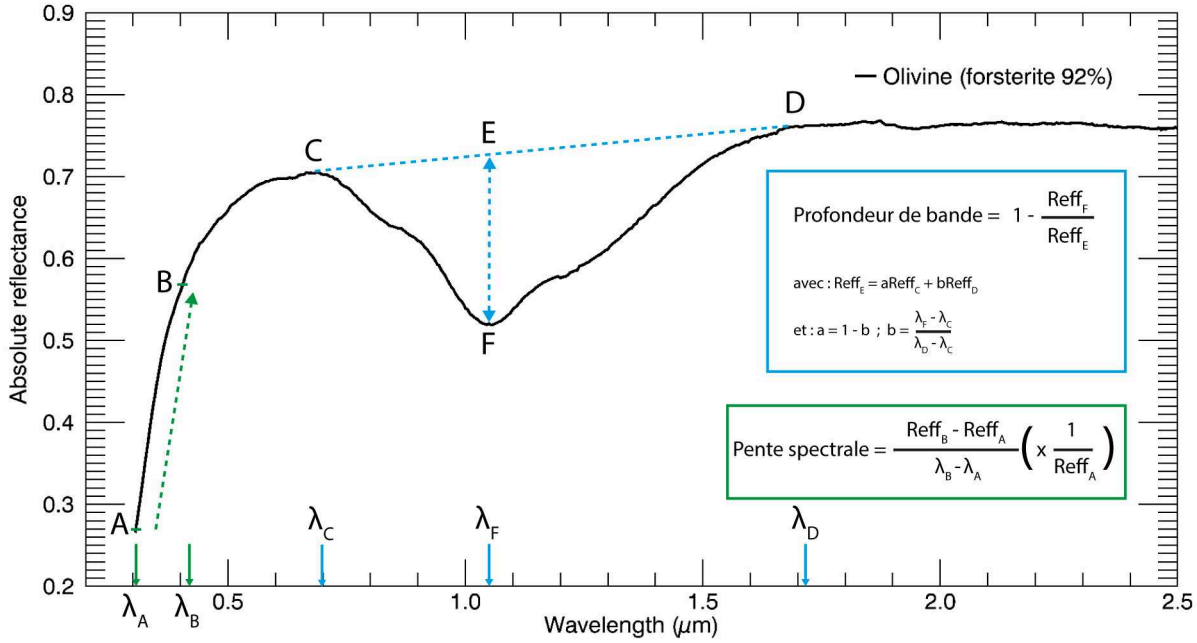


FIGURE 4.4 – Spectre d'olivine (échantillon PO-CMP-076 de la librairie spectrale du PDS). La profondeur d'une bande se calcule à la longueur d'onde où elle est la plus profonde et relativement à la valeur de réflectance du continuum estimé en ce point (voir par exemple Clark and Roush (1984) pour plus de détails) ; dans l'idéal les points C et D ont la même réflectance.

mettre cette étude, peut aussi être utilisée pour étudier la photométrie d'une surface. La différence d'approche majeure entre la spectroscopie et la photométrie est que la première peut être réalisée à partir d'une seule acquisition, celle-ci fournissant un ou plusieurs spectres. La photométrie peut quant à elle uniquement être étudiée avec un jeu de données dont les géométries d'observations sont variées. Cette approche sera détaillée dans la sous-section 5.1. Dans la réalité les deux sont extrêmement liées puisque l'analyse spectroscopique peut être menée à bien si elle tient compte de la géométrie d'observation, celle-ci se faisant rarement au nadir. Le plus souvent, une correction dite « photométrique » est appliquée au spectre afin de l'analyser et surtout afin de permettre sa comparaison aux autres spectres acquis dans différentes conditions d'observations.

En spectroscopie passive c'est la lumière du Soleil qui est utilisée. Celle-ci interagit avec la surface (et éventuellement avec l'atmosphère, ce qui complique l'analyse et l'interprétation lorsqu'on étudie la surface) et provoque dans son spectre des bandes d'absorptions ou des pics d'émission, se traduisant par des minima ou des maxima plus ou moins larges dans le signal reçu. Dans la gamme spectrale visible-proche infrarouge (typiquement de 0.4 à 5.0 µm environ) les signatures spectrales sont sous forme de bandes d'absorptions (si la température n'est pas trop importante) et sont généralement dues à la vibration des molécules (voir figure 4.3 pour la molécule d'eau) ou à des transferts de charges ou à des transitions électroniques au sein des atomes (une signature bien connue est celle de l'ion fer II – Fe^{2+}). Ces transitions électroniques ont plutôt des signatures dans l'ultraviolet et le visible tandis que les vibrations moléculaires exhibent des signatures plutôt dans l'infrarouge (voir par exemple Le Bras and Érard (2003)). A noter qu'une molécule (H_2O dans la glace d'eau par exemple) possède plusieurs signatures très marquées dites fondamentales liées à un mode de vibration. Mais on observe également d'autres signatures, plus

faibles, appelées harmoniques ou encore des signatures provoquées par la combinaison des modes de vibration.

On caractérise un spectre en calculant des grandeurs caractéristiques reliées à la teneur en un composé spécifique ou indicateur de l'état de la surface : profondeur des bandes d'absorptions, niveau de réflectance du continuum, pentes spectrales... (voir figure 4.4 et par exemple Clark and Roush (1984); Clark (1999)). Pour compléter ce rapide survol des principes de la spectroscopie, le lecteur trouvera de nombreuses informations dispersées notamment dans : Adams (1975); Clark and Roush (1984); Burns (1989); Clark (1999); Burns (2005). Enfin, quelques détails sur l'interaction lumière/matière seront traités en section 9.1 page 191 de la partie III.

4.2 L'instrument VIRTIS/Rosetta

VIRTIS, pour *Visible InfraRed and Thermal Imaging Spectrometer*, est un instrument à part entière mais se divise en deux voies optiques, dont le fonctionnement est distinct mais qui partage la même électronique. VIRTIS-M (VIRTIS-M) est un spectro-imageur, décrit dans la sous-section 4.2.1. VIRTIS-H (VIRTIS-H) est un spectromètre décrit dans la sous-section 4.2.2. Cet instrument a connu un successeur ayant terminé sa mission avant lui (!), puisqu'un autre modèle de VIRTIS fût embarqué sur la sonde Vénus Express. Avant de donner les caractéristiques plus détaillées de l'instrument, voici quelques informations pouvant intéresser le lecteur qui souhaiterait se frotter à VIRTIS et à son jeu de données de plus près.

La plupart des documents dont il est fait référence ci-dessous, de même que la suite de programmes IDL permettant de lire les données VIRTIS, « LecturePDS », et sa documentation sont disponibles sur le site du LESIA de l'Observatoire de Paris. La description technique de l'instrument, de même que le format des données, est décrit dans le document « VIRTIS EAICD » (*Data Archive Documentation)*. Les données VIRTIS sont accompagnées de fichiers géométriques (voir sous-section 4.3) dont la documentation la plus récente (au 06/2017) est la version « VIRTIS extended geometry files v0.7g ». VIRTIS-H possède

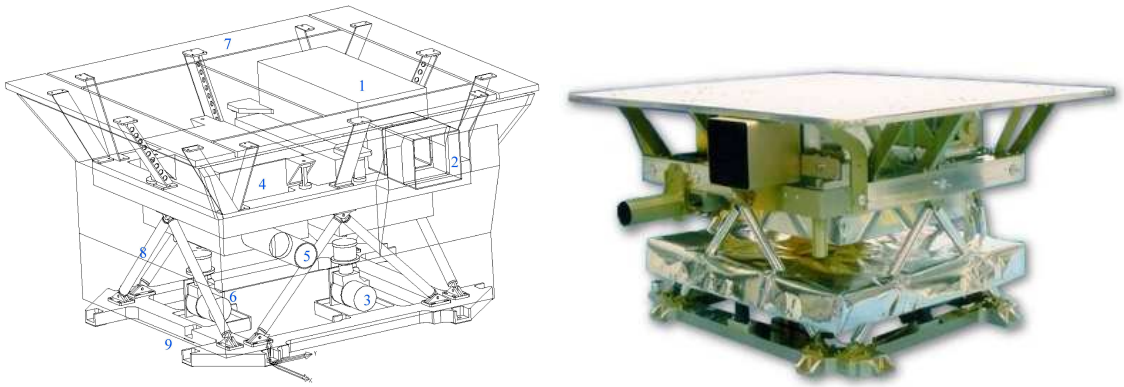
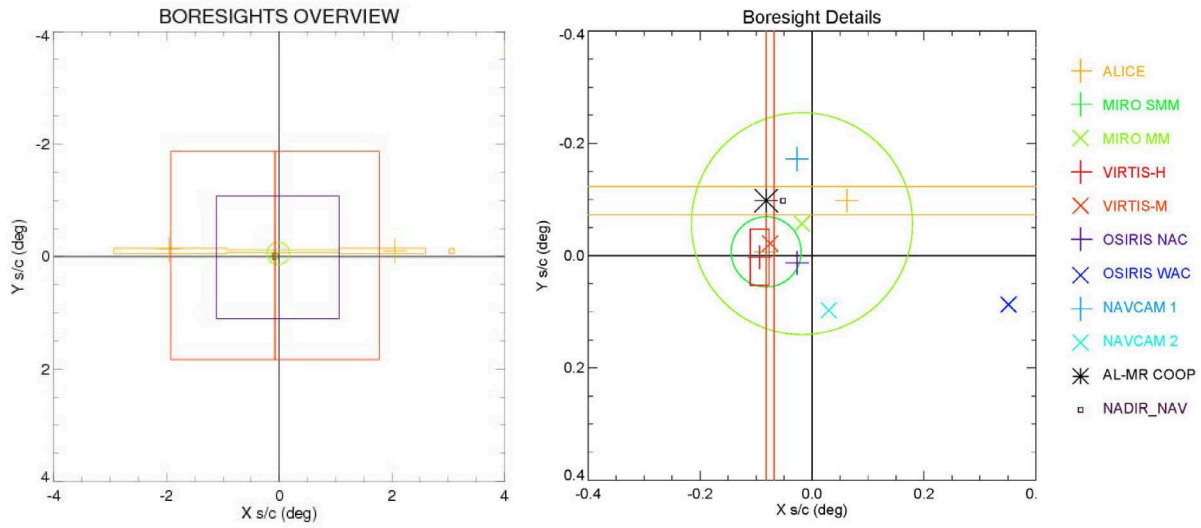
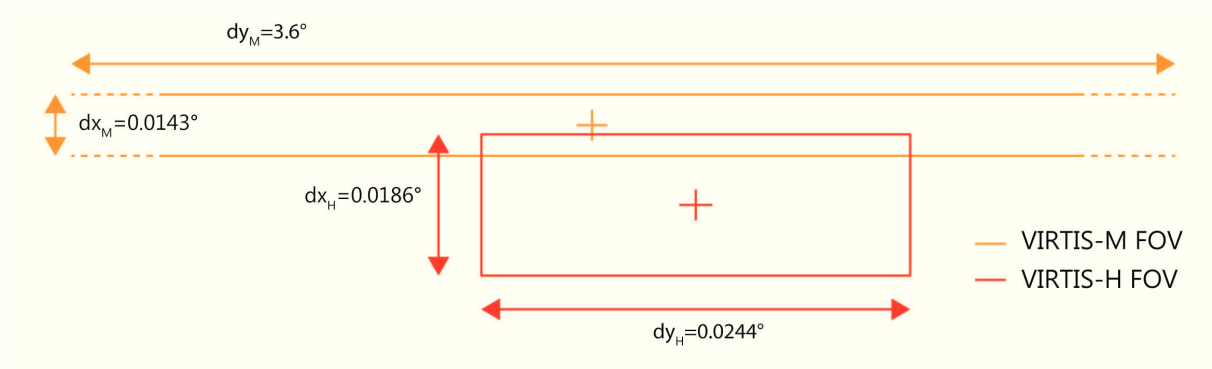


FIGURE 4.5 – En haut, schéma de VIRTIS : VIRTIS-M (1), son baffle (2) et son cryocooler (3) ; VIRTIS-H (4), sa baffle (5) et son cryocooler (6). En (7) le radiateur ; en (8) la structure en titane et en (9) la plate-forme construite par l'industriel. En bas, le même en vrai, avant l'intégration.



(a) Champ de vue des instruments de Rosetta.



(b) Champs de vue de VIRTIS-M et VIRTIS-H.

FIGURE 4.6 – Les champs de vue des instruments de Rosetta et de VIRTIS.

une documentation relative à sa calibration, réalisée au LESIA. Concernant VIRTIS-M, le lecteur est renvoyé vers la thèse d'Andrea Raponi, 2013. Enfin, les caractéristiques et objectifs scientifiques globaux peuvent être trouvés dans Coradini et al. (2007) et dans Coradini et al.,2009 dans Schulz and Tozzi (2009).

La calibration des fichiers VIRTIS est abordé dans l'annexe 9.5.3 et dans la sous-section 5.2.2. Ici sont données les références des versions de calibration des fichiers utilisés dans cette étude. Dans le futur, la calibrations des données VIRTIS est susceptible d'évoluer.

— Pour VIRTIS-M les données « *ARTIFACT-REMOVED* » calibrées en réflectance (I/F) dans leur version « *refl_ar_1.0.0* » ont été utilisées.
— Pour VIRTIS-H les données utilisées sont calibrées en radiance (voir 9.5.3) avec la version de logiciel « *CALIBROS_1.2_150126* ».
— La géométrie utilisée est celle de la version « *GEOROS_7.0e* ».

4.2.1 VIRTIS-M

VIRTIS-M (M pour *mapping*), est le spectromètre imageur de l'instrument. Ses caractéristiques techniques sont résumées dans les deux colonnes centrales du tableau disponible dans l'annexe 9.1 page 272. C'est cette voie qui possède la capacité de fournir des cartes et ce, dans le visible et l'infrarouge. Pour cela, VIRTIS-M utilise deux capteurs utilisant chacun 432 canaux spectraux. Le capteur visible, un CCD 1024×508 Thomson TH7896, est sensible de 0.22 µm à 1.05 µm. Le capteur infrarouge, basé sur un détecteur 432×270 Raytheon Cadmium-Mercure-Tellure (CdHgTe), est sensible de 0.95 µm à 5.06 µm. Les deux voies possèdent ainsi un échantillonnage spectral de 1.8 nm/canal et 9.8 nm/canal et un pouvoir de résolution allant de 70 à 380 environ. Le champ de vue d'un seul pixel est de 250 µrad de côté, soit, pour 256 pixels au total, un champ de vue total de 64 mrad. Cela conduit à une taille d'environ 2.5 mètre par pixel à 10 km de la surface.

Les schémas 4.7 et 4.8 représentent le design optique et la partie interne de VIRTIS-M. La longueur focale du télescope utilisé pour VIRTIS-M est de 152 mm pour une ouverture de f/5.6 pour le détecteur visible et de f/3.2 pour le détecteur infrarouge. Après une succession de réflexion sur différents miroirs (de M1 à M5 figure 4.7), la lumière entre par la fente (3 figure 4.8), équipée d'un obturateur électromécanique, puis frappe le miroir (1) pour être réfléchie sur les réseaux de diffraction visible et infrarouge imbriqués l'un dans l'autre (2). À partir de là, les deux faisceaux infrarouge et visible sont décorrélés spatialement. Le signal infrarouge est alors dirigé vers le plan focal du détecteur infrarouge (4) et le signal visible vers celui du détecteur visible (5) à l'aide d'un miroir (6). Sur chaque détecteur sont disposés des filtres permettant de filtrer les différents ordres du réseau. Sur les matrices, une dimension correspond à celle de la fente tandis que la deuxième est utilisée pour la dispersion de la lumière, c'est donc la dimension spectrale (voir figure 4.2, mode push-broom). Le lecteur trouvera plus de détails dans Filacchione et al. (2006); Coradini et al. (2007); Raponi (2013).

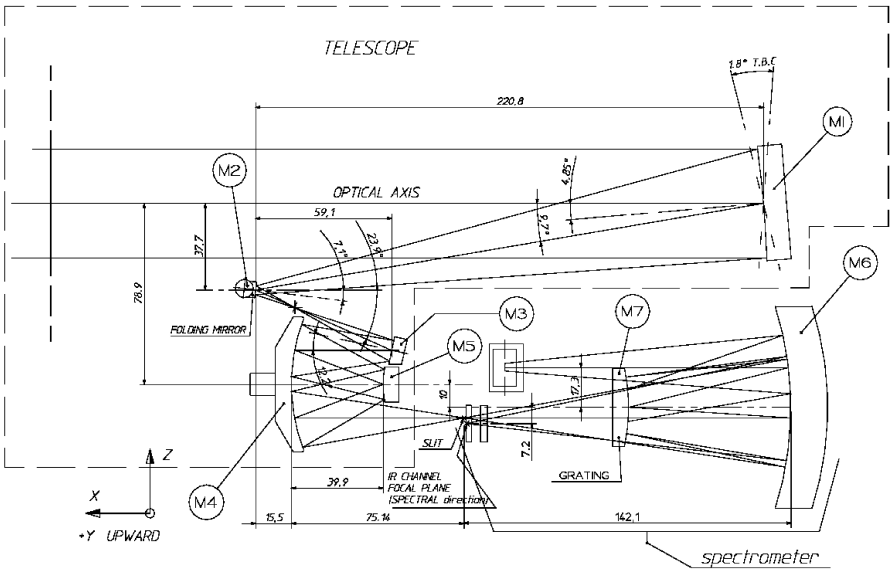


FIGURE 4.7 – Design optique de VIRTIS-M. Le miroir M1 est pivotant, permettant de scanner la surface.

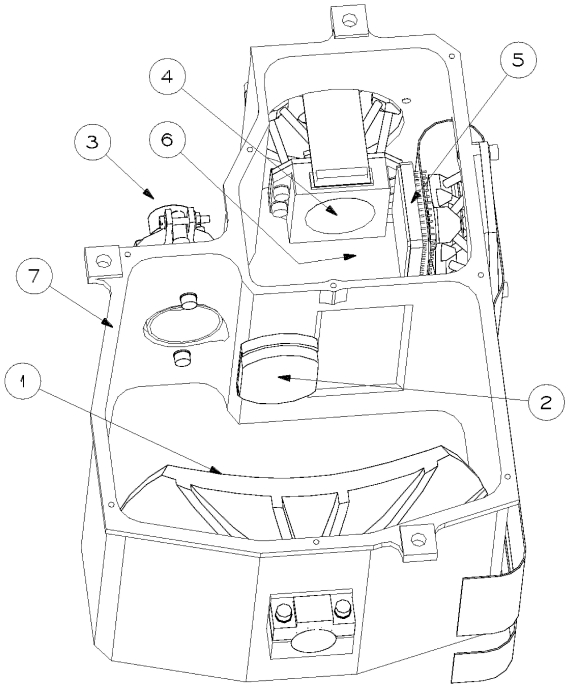


FIGURE 4.8 – Schéma de la structure de VIRTIS-M. (1) Miroir ; (2) Réseau de diffraction ; (3) Fente (entrée de la lumière) avec obturateur ; (4) Plan focal infrarouge ; (5) Plan focal visible ; (6) Position du miroir sur le plan focal visible (non représenté) ; (7) Structure de l'instrument. Tiré de Raponi (2013).

4.2.2 VIRTIS-H

VIRTIS-H (H pour *high-resolution*) est un spectromètre infrarouge à plus haute résolution spectrale que VIRTIS-M. Contrairement à ce dernier, il ne donne pas accès à la dimension spatiale. En revanche, son pouvoir de résolution est bien plus grand et s'étend de 1300 à 3000 selon la gamme de longueurs d'onde considérée (ou ordre spectral, voir figure 4.11). VIRTIS-H repose sur le même détecteur IR que VIRTIS-M et est sensible de 1.88 µm à 5.03 µm avec un échantillonnage spectral de 0.6 nm/canal. Son champ de vue instantané est rectangulaire, de 0.50 par 1.50 mrad environ. Sa résolution spatiale est donc de 5×15 m à 10 km d'altitude.

VIRTIS-H est un spectromètre échelle et son fonctionnement diffère de VIRTIS-M dans le sens où les deux dimensions du capteur infrarouge sont utilisées comme dimension spectrale. D'après le schéma du design optique de l'instrument figure 4.9, la lumière entre par un télescope d'ouverture f/1.6 puis est déviée par un miroir parabolique vers un collimateur. Un prisme assure une première dispersion de la lumière, suivi d'un réseau de diffraction achevant cette tache. Après la traversée d'un objectif ouvert à f/1.67 les différents ordres spectraux se projettent sur le capteur infrarouge sans recouvrement directionnel (voir figures 4.10 et 4.12). Huit ordres sont utilisés pour assembler un spectre VIRTIS-H ; ce sont les ordres 8 à 13 mais que l'on appelle 0 à 7. En fonctionnement nominal, les spectres sont extraits et reconstruits à bord.

A priori, les capacités d'imagerie de VIRTIS-M le destine à l'étude du noyau, tandis que la conception, résolution et la gamme spectrale de VIRTIS-H le rendent plutôt adapté pour l'étude de la coma. Bien

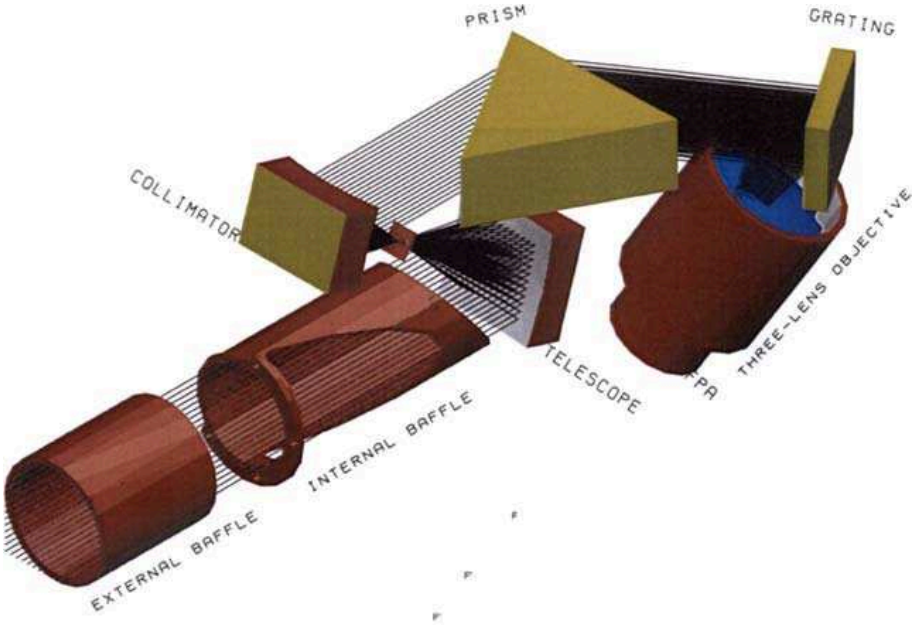


FIGURE 4.9 – Design optique de VIRTIS-H.

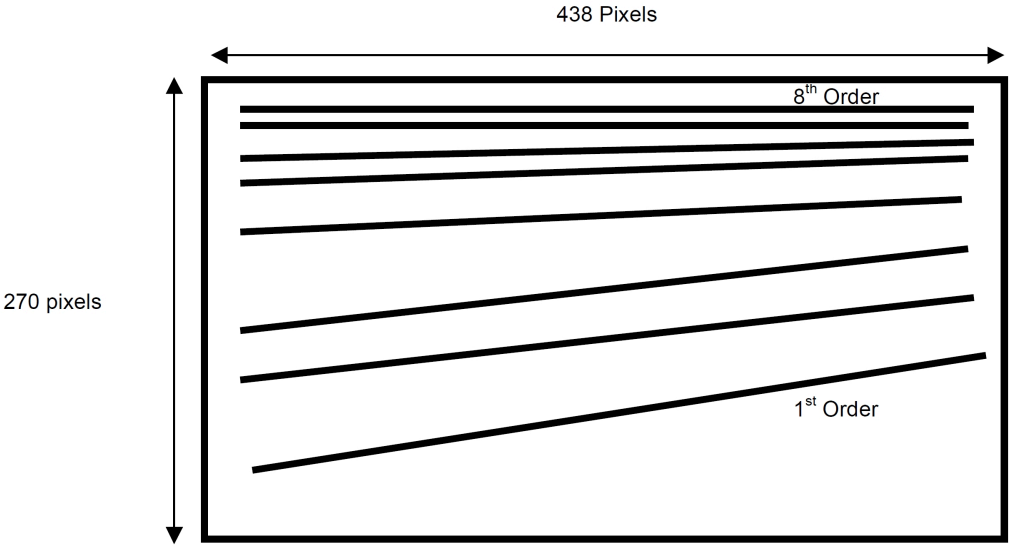


FIGURE 4.10 – Schéma de projection des ordres spectraux sur le capteur infrarouge de VIRTIS-H. Voir aussi la figure 4.12 pour la photo du capteur.

que ces instruments aient été conçus dans ce but et afin d'assurer une telle complémentarité, il s'avère qu'au cours de la mission, les deux instruments ont dédiés leurs observations à ces deux objectifs. Même en l'absence de capacité d'imagerie, VIRTIS-H est tout à fait en mesure de fournir des informations spectrales et photométriques sur le noyau. Capable de détecter la signature des glaces, il peut être complémentaire de VIRTIS-M sur ce terrain. De plus, la couverture de la gamme 2-5 µm le rend tout à fait adapté à l'étude des températures de surface. Cet aspect fût même une de ses taches principales après que le canal infrarouge de VIRTIS-M n'eut plus pu être utilisé à partir d'avril 2015 (voir sous-section 4.2.3). Des cartes ont ainsi été réalisées grâce à des opérations de la sonde.

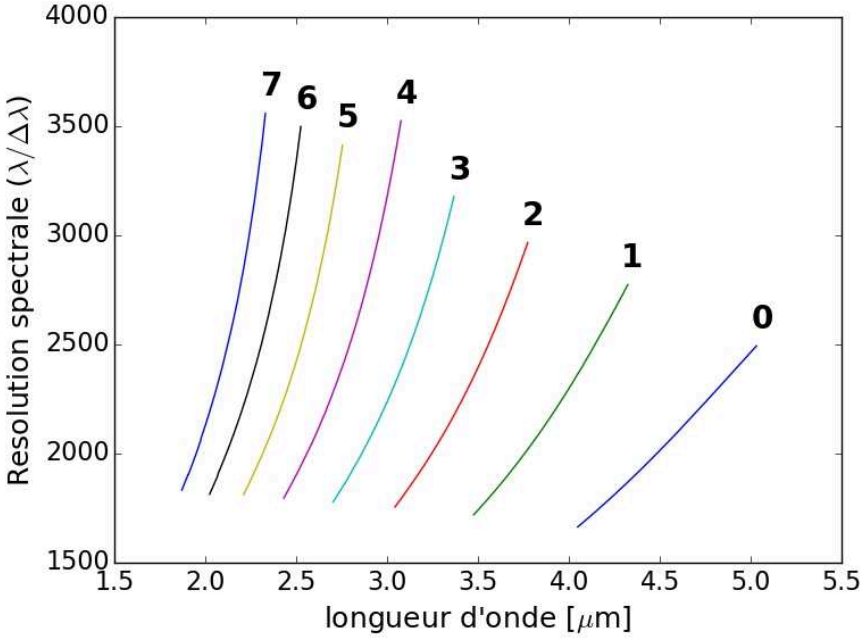


FIGURE 4.11 – Résolution spectrale et couverture en longueur d'onde de chaque ordre de VIRTIS-H. Non seulement la résolution varie d'un ordre à l'autre mais il existe un recouvrement en longueurs d'onde entre chacun. Les fonctions de transferts permettent de déterminer quelles parties de chaque ordre il est préférable de choisir pour construire un spectre continu. Tiré de Debout (2015, thèse, page 39).

4.2.3 Détails techniques et problèmes connus

Contrairement à leurs homologues terrestres, les instruments envoyés sur des sondes spatiales doivent répondre à des exigences extrêmement poussées pour être fiables durant de nombreuses années, sans possibilités de remplacement, tout en résistant aux contraintes d'une épopée spatiale (vibrations au lancement, températures extrêmes, rayons cosmiques...). Le fonctionnement d'un spectro-imageur est donc quelque chose de délicat et contraignant dans un tel environnement. Les sous-sections suivantes présentent certains détails techniques relatifs à VIRTIS-M et VIRTIS-H. Les problèmes connus concernent VIRTIS-H, seul le problème de refroidissement concerne VIRTIS-M infrarouge.

4.2.3.1 Calibration absolue

L'optique et le capteur photosensible fonctionnant par définition ensemble lorsque l'on mesure un signal une fois l'instrument monté, la calibration au sol prend en compte les caractéristiques de chacun. Celle-ci reste difficile à réaliser et n'est jamais absolue car les sources de lumières, même correctement caractérisées, possèdent des sources d'incertitudes (courant, température, étendue spatiale par rapport au champ de l'instrument...). L'idéal, si cela est possible, est donc de réaliser une calibration absolue une fois en vol

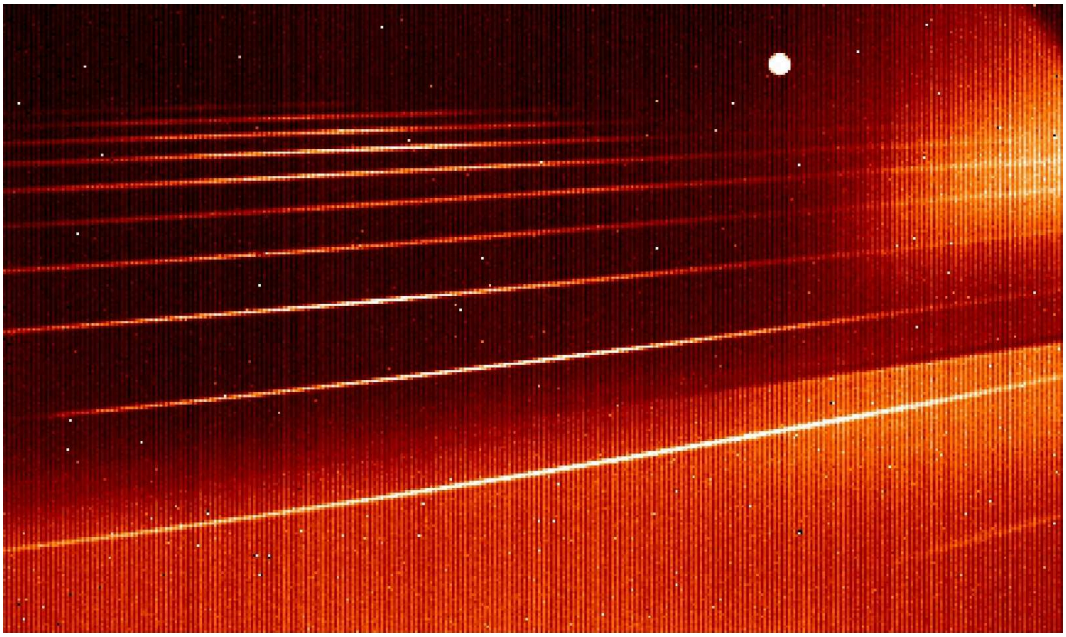


FIGURE 4.12 – Matrice infrarouge de VIRTIS-H sur lequel on distingue les ordres spectraux (lignes diagonales), ainsi que divers phénomènes parasites : pixels morts (tache en haut à droite), pixels saturés (« *spikes* », point brillant dispersés aléatoirement), lumière parasite (tache diffuse en haut à droite). Données issues du cube brut H1_00388481382.QUB dans MTP015/STP053 (mode backup où toute la matrice est lue). La dynamique a été ajustée.

grâce à une source de lumière très bien caractérisée : une étoile de référence. C'est ce qu'a fait VIRTIS-M puisque la couverture spatiale dont il dispose lui permet d'imager le ciel avec aisance sans passer à côté de l'étoile visée. VIRTIS-H ne possède pas un champ de vue suffisamment grand pour espérer viser correctement une étoile. Une calibration absolue en cours de vol n'est donc pas envisageable et il est préférable d'appliquer une nouvelle calibration dérivée de celle réalisée au sol qui tiendrait compte des changements ayant eu lieu après. Le but est alors de réduire au maximum l'erreur relative et donc pour cela de la caractériser le mieux possible. C'est cette méthode qui s'appliquera à VIRTIS-H.

4.2.3.2 Refroidissement - Cryocooler

VIRTIS doit fonctionner à des températures très faibles afin de limiter le bruit et le fond thermique dans le détecteur. Ces températures sont de l'ordre de 150 à 190 K pour le détecteur visible de VIRTIS-M et de 65 à 90 K pour les détecteurs infrarouges de VIRTIS-M et H. Le refroidissement de VIRTIS-M visible est assuré par le radiateur en mode passif tandis que ceux de VIRTIS-M infrarouge et VIRTIS-H sont assurés par deux cryocooler distincts qui permettent donc d'atteindre des températures cryogéniques ($\leq 80K$). Un des problèmes majeurs de VIRTIS durant la mission a été la défaillance du cryocooler de VIRTIS-M infrarouge, mettant ainsi fin à ses opérations bien que le reste de l'instrument fonctionne encore. Si sa température est trop élevée, l'agitation thermique d'un détecteur infrarouge est trop importante pour qu'il puisse observer. VIRTIS-M infrarouge devenant inopérant, VIRTIS-H fût par conséquent le seul instrument à bord de Rosetta capable de sonder la surface dans le proche infrarouge, domaine dans lequel la seule bande d'absorption du spectre de la comète est présent comme on le verra par la suite

mais aussi où est présente la bande d'absorption à 2.9 µm de la glace d'eau. Surtout, seules les données de VIRTIS-H sont devenues utilisables après MTP015 (avril 2015) afin de calculer la température de surface.

Ce type de panne n'est pas extrêmement surprenant en soit. En effet, un cryocooler doit permettre la circulation d'un fluide frigorigène et repose donc sur le fonctionnement d'un mécanisme. Or, dans un système miniaturisé subissant les aléas d'un voyage spatial et les contraintes liées à une utilisation intensive sans possibilité de remplacement, tous les mécanismes deviennent facilement des sources de pannes ou de défaillances tant les contraintes qui leurs sont imposées peuvent être importantes. Sur Venus-Express les cryocoolers de VIRTIS-M et VIRTIS-H ont fonctionné durant 5585 heures et 5252 heures pour 611 et 617 cycles respectivement, soit un peu plus que les 5000 heures pour lesquels ils sont qualifiés. Sur Rosetta, il possible de dire que celui de VIRTIS-M est tombé en panne prématurément puisque cumulant 2375 heures pour 186 cycles ; à l'inverse, le cryocooler de VIRTIS-H a duré toute la mission et a été plutôt endurant en fonctionnant 7428 heures pour 416 cycles.

4.2.3.3 Filtre infrarouge

Sur la matrice de VIRTIS-H représenté en figure 4.12, on peut observer que le tiers inférieur, comprenant l'ordre 0 (grandes longueurs d'onde), contient plus de signal que le reste de la matrice (hormis la tache en haut à droite, voir paragraphe suivant). Il s'agit de la zone non couverte par un filtre placé sur le capteur et utilisé pour atténuer le signal infrarouge émit par l'instrument lui-même dans les ordres supérieurs. On voit l'effet de ce filtre dans le spectre brut de la figure 4.13 où la partie non filtrée donne un signal élevé, ce qui provoque un élargissement de la dynamique notamment mais permet de travailler dans la partie linéaire du détecteur et d'avoir finalement un signal de meilleur qualité, moins bruité. Dans un spectre calibré on tient compte de cette différence de niveau grâce à la soustraction du courant d'obscurité.

4.2.3.4 Pixels chauds

La figure 4.12 représente le détecteur (CdHgTe) de VIRTIS-H lors d'une acquisition (la dynamique a été ajustée), on y observe donc à la fois le signal, qui est illustré par la projection des ordres spectraux en diagonales – l'ordre 0 étant le plus bas dans la figure et l'ordre 7 parmi les plus hauts visibles (les autres ordres que l'on peut distinguer ne sont pas utilisés) – mais aussi le fond thermique, qui constitue tout le reste. En plus du signal et du fond se trouvent des éléments aléatoires. Les *spikes* sont les points plus brillants que le reste de la matrice et sont répartis aléatoirement sur le détecteur. Ce sont souvent voire toujours les mêmes au cours du temps mais il peut y en avoir de nouveaux au cours du temps. Ils ne posent pas de problèmes s'ils ne sont pas sur les ordres spectraux mais si c'est le cas, il est plus difficile d'appliquer une correction sans perdre en même temps le signal de ces pixels. La tache circulaire nettement délimitée en haut à droite est également saturée mais en raison de la dynamique appliquée à l'image. Il s'agit d'un groupe de pixels chaud, initialement présent au sol mais qui ne pose pas de problèmes car les ordres spectraux ne se projettent pas dessus.

4.2.3.5 *Pixel map*

Un des problèmes rencontrés par VIRTIS-H a été le décalage de la projection des ordres spectraux sur la matrice du capteur probablement en raison des vibrations lors du décollage. Ce décalage a ainsi nécessité une ré-évaluation de la carte des pixels à prendre en compte (la *pixel map*) lors de la lecture du capteur ainsi que de la *registration* spectrale. Pour se faire, l'acquisition de la matrice entière doit être faite afin de pouvoir recalculer la carte des pixels. Ce type de décalage peut être problématique, il provoquera un décalage spectral s'il a lieu dans la direction de la plus grande dimension du capteur (voir figure 4.10) mais surtout il est synonyme d'une perte de signal (et ce quelqu'en soit la direction). En effet, pour une longueur d'onde donnée, on intègre le signal sur quelques pixels uniquement. Si ce dernier est décalé alors une partie du signal en dehors de cette zone est prise en compte. Ce problème de décalage des ordres projetés sur la matrice a été rapidement détecté et pris en compte en début de mission sur VIRTIS-H ; aucune évolution n'a été constaté par la suite.

4.2.3.6 Effet « pairs-impairs »

Les capteurs embarqués dans les instruments d'imagerie spatiale doivent être très fiables et très performants car ils sont souvent utilisés pour capter un signal très faible. Ce niveau d'exigence engendre une conception particulière qui n'est pas exempte de défauts ou d'effets auxquels on ne peut échapper. C'est le cas de l'effet dit « pairs-impairs » qui trouve son origine dans l'entrelacement du circuit de lecture du capteur. Il est observable sur la figure 4.12 par l'alternance dans chaque colonne de pixel d'un signal plus ou moins important. Concrètement, cela signifie que certaines longueurs d'onde renvoient un signal plus important (il faut bien comprendre ici que c'est un effet lié à la lecture du capteur, le signal arrivant dessus est bien le même), phénomène qui s'illustre par un motif en dents de scie sur un spectre. Ce

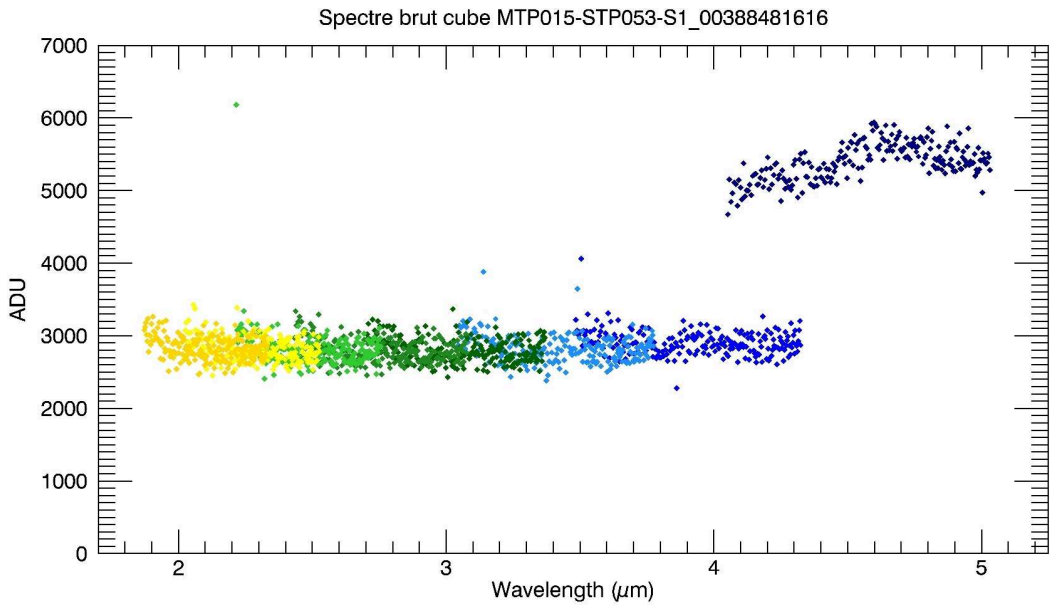
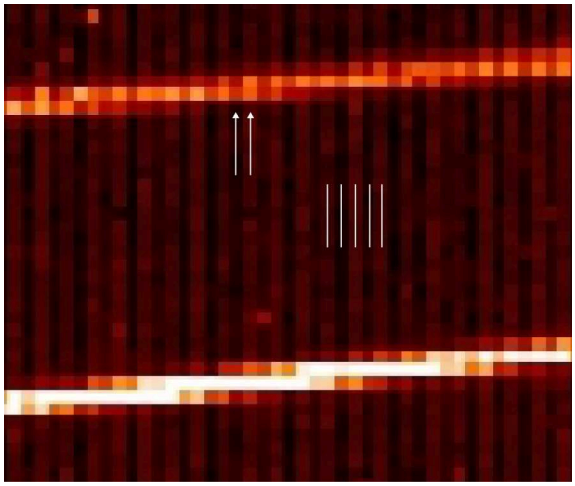
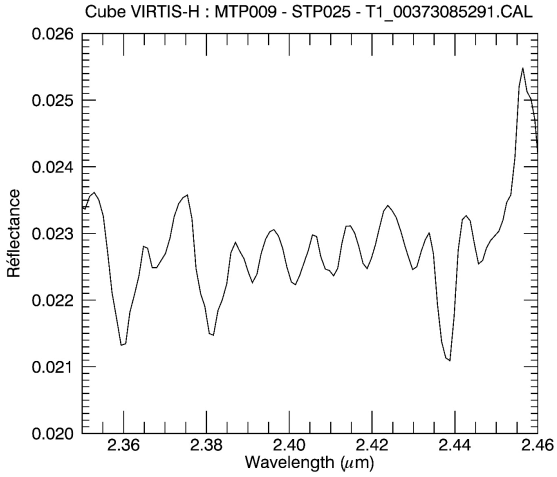


FIGURE 4.13 – Spectre brut en ADU (*Analog to Digital Unit*) illustrant l'effet du filtre utilisé pour limiter le signal IR de l'instrument sur les courtes longueurs d'onde.



(a) Zoom sur l'image du capteur de la figure 4.12. On distingue clairement ici les colonnes de pixels où le signal est alternativement plus faible et plus élevé selon l'alignement des traits blanc sans flèches. Le problème est aussi visible sur la projection des ordres spectraux (flèches blanches).



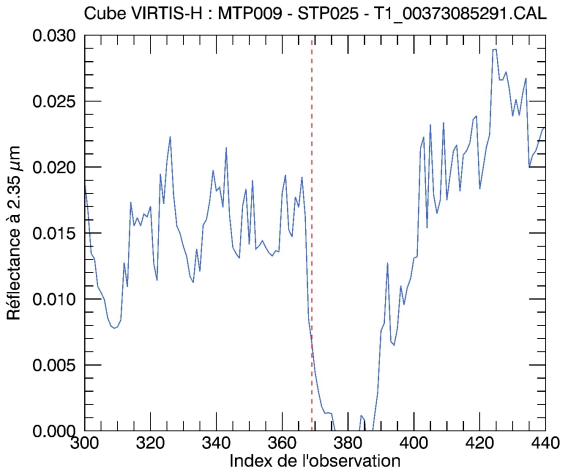
(b) Ce phénomène s'illustre par un effet en dents de scie visible sur cette portion de spectre du cube T1_00373085291.

FIGURE 4.14 – Illustration de l'effet pair-impair sur un spectre VIRTIS-H.

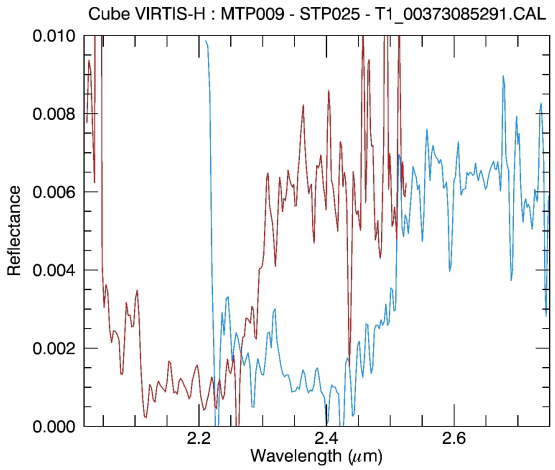
phénomène n'étant pas linéaire, une correction définitive ne peut être appliquée. Une méthode consiste donc à ne sélectionner qu'un canal sur deux, mais cela conduit donc à une diminution de la résolution spectrale.

4.2.3.7 Réseaux de diffraction

VIRTIS-H souffre aussi d'un problème d'optique lié aux deux réseaux qu'il utilise et qui sont placés côte à côte. Ces deux réseaux possèdent deux angles de blaze différents permettant d'élargir le domaine spectral mesuré dans chaque ordre. Mais ces deux réseaux ne semblent pas être alignés comme il devrait l'être et la conséquence est qu'ils n'observent pas exactement la même zone du champ de vue. Ce problème n'est pas grave pour des études de la coma car le champ d'observation est uniforme. En revanche, observer la surface ainsi peut être source de déformations des ordres spectraux si un des réseaux observe une zone éclairée tandis que le deuxième observe une zone dans l'ombre. C'est le cas également lors d'observation au limbe ou lors des transitions ombres/lumières et vice versa. La figure 4.15a illustre ce problème et un des cas possibles, en l'occurrence le passage rapide de la lumière à l'ombre lors de l'acquisition d'un cube. En 4.15a est représenté le signal au cours de l'acquisition d'un cube VIRTIS-H. Entre les observations 360 et 380 le champ balaye une zone située à l'ombre, ce qui fait chuter le signal rapidement pendant l'équivalent de quelques minutes. Si l'on regarde dans la zone de transition, à l'acquisition n°369, on obtient le spectre de la figure 4.15b (seul les ordres 5 et 6 sont tracés pour plus de clarté). On voit alors que la partie des petites longueurs d'onde dans chaque ordre manifeste une réflectance très faible, classique d'une zone à l'ombre, tandis que la partie grandes longueurs d'onde présente elle une réflectance typique d'une zone éclairée. Tout se passe donc comme si un des réseaux observait la zone du champ de VIRTIS-H déjà située dans l'ombre alors que l'autre est encore dans la zone éclairée, ce qui, en situation normale, ne devrait pas être le cas.



(a) Réflectance au cours du temps du cube T1_00373085291. L'acquisition 369 a été utilisé (trait rouge) pour la figure 4.15b, la baisse de signal indique le passage d'une zone éclairée à une zone d'ombre.



(b) Les ordres 5 et 6 de ce cube VIRTIS-H sont particulièrement affectés par le problème lié aux réseaux. Chacun des deux ordres présente un déséquilibre du signal reçu car les deux réseaux utilisés n'observent pas la même zone du champ de vue. Ici du côté des grandes longueurs d'onde car le champ de vue passe de la lumière à l'ombre (voir figure 4.15a).

FIGURE 4.15 – De l'ombre à la lumière avec VIRTIS-H. Illustration du problème affectant les réseaux de diffraction pour le cube MTP009 - STP025 - T1_00373085291. L'acquisition numéro 369 a été utilisée.

4.2.3.8 Lumière diffusée

Enfin, un problème majeur est illustré par la tache diffuse que l'on peut observer en haut à droite de l'image de la matrice (figure 4.12). Cette tache provient d'une lumière hors champ, ne suivant pas le chemin optique car non dispersée et diffusée à l'intérieur de l'instrument. Le problème résultant est qu'une quantité importante de signal est présent sur une partie des ordres supérieurs. Ce problème est extrêmement complexe à corriger étant donné qu'il est variable dans le temps et difficilement quantifiable la plupart du temps. De plus, il peut être confondu ou se cumuler avec le problème évoqué précédemment, à savoir lorsque le champ de vue passe d'une zone d'ombre vers une zone éclairée (l'inverse de l'exemple de la figure 4.15) et que le signal est réparti inégalement vers les courtes longueurs d'onde. La figure 4.16 illustre l'effet de cette lumière diffusée.

4.2.4 Calibration et filtrage des données

Pour VIRTIS-M, c'est l'équipe de l'IAPS à Rome qui s'est chargé de la calibration et de la correction des données. On trouve parmi ces corrections la suppression d'artéfacts liés aux jonctions de filtres situés avant les capteurs, notamment à 0.65 µm, 1.5 µm et 2.5 µm. Les fichiers calibrés incluent également la suppression des *spikes* les plus importants. Seuls deux artéfacts qui affectent le canal visible de VIRTIS-M et n'ont pas pu être corrigés malgré les procédures de calibration. Ils ont des conséquences sur les longueurs d'onde avant 400 nm et la gamme 800-1000 nm. Ces artéfacts sont causés par une lumière parasite venant du réseau de diffraction infrarouge (voir design de l'instrument figure 4.8).

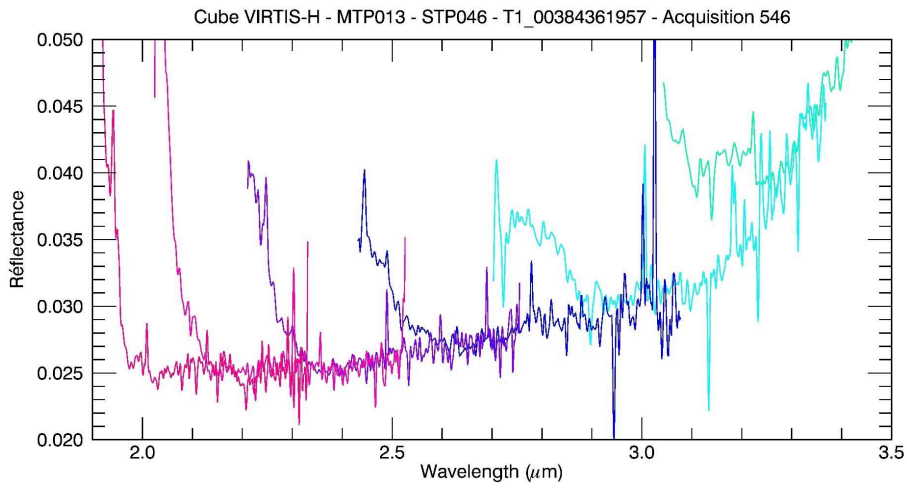


FIGURE 4.16 – Spectre de l'acquisition 546 du cube VIRTIS-H MTP013/STP046/T1_00384361957. Chaque début d'ordre (côté courtes longueurs d'onde) subit un surplus de flux provenant de la lumière diffusée à l'intérieur de l'instrument.

Concernant VIRTIS-H, il est difficile de corriger de manière systématique les effets de la lumière diffusée ou du problème causé par les réseaux étant donné leur nature très variable et dépendante des conditions d'observations. Aucune correction n'a donc été intégré au pipeline de calibration à l'heure actuelle. De même, le niveau absolu de VIRTIS-M étant incertain, toute amélioration future passera par une comparaison avec le niveau de VIRTIS-M qui est plus fiable car recalibré en vol.

Pour limiter les effets de la lumière diffusée, du décalage des réseaux, du bruit et de l'effet pair/impair, il existe cependant plusieurs stratégies applicables soit systématiquement en faisant un compromis sur le résultat soit au cas par cas en raffinant l'analyse du spectre étudié. Comme vu précédemment, la lumière diffusée affecte seulement une des deux extrémités des ordres spectraux. Or, tous les ordres se chevauchent (voir tableau 9.1 page 272 en annexe) et offrent ainsi la possibilité de ne sélectionner qu'une gamme spectrale restreinte dans chacun d'eux (voir paragraphe suivant et annexe 9.5.3), éliminant parfois les effets indésirables. De même, afin de diminuer l'impact de l'effet pair/impair, il est possible de ne sélectionner que les canaux pairs ou impairs. Cela permet de diminuer le motif en dents de scie. En revanche, la conséquence est que le taux d'échantillonnage est divisé par deux.

Enfin, de façon à nettoyer au mieux les spectres étudiés, il est possible de trier les canaux spectraux ayant une tendance à l'instabilité en plus de ne sélectionner que la partie la moins bruitée dans chaque ordre. Ce fût un des premiers travaux de cette thèse qui a reposé sur l'analyse de l'ensemble des observations noyaux de VIRTIS-H entre les phases d'approche de la comète, MTP006 et jusqu'à MTP017. Pour cela, l'écart type du signal reçu est calculé pour chaque spectel (canal spectral) de chaque cube observant le noyau et ce pour tous les cubes disponibles. Enfin, ces écarts types sont moyennés. Cette méthode permet donc de mettre en avant et d'éliminer les spectels dont le comportement est erratique sur une échelle temporelle importante. Les *spikes* au sein des cubes ne sont donc pour la plupart pas éliminés puisque ce comportement ne se répète pas toujours. La liste des canaux sélectionnés est disponible en annexe 9.5.3 page 273. La figure 4.17 page suivante présente les figures résumant le processus décrit ci-dessus.

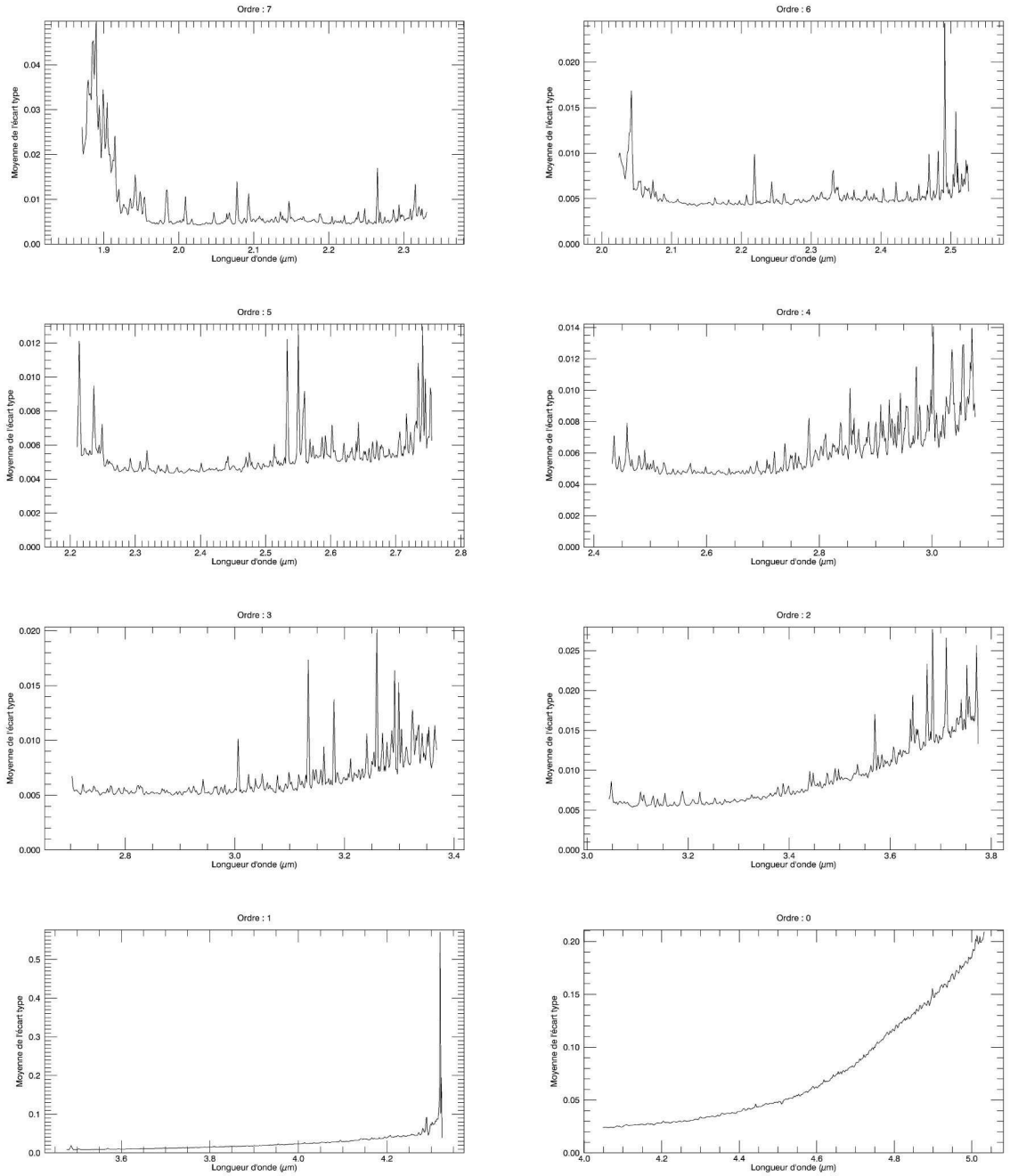


FIGURE 4.17 – Moyenne temporelle des écarts type des observations VIRTIS-H noyaux entre MTP006 et MTP017.

4.3 Le jeu de données VIRTIS

L'ensemble du jeu de données est disponible à la communauté via le site d'archivage de l'ESA (l'Agence Spatiale Européenne), le PSA (Planetary Science Archive). Celui-ci est conséquent puisque la mission couvre plus de deux ans d'observations. Les phases d'observations sont découpées en différentes périodes que l'on pourra retrouver en détails dans l'annexe 9.5.3 page 265. Les principales périodes de ce

découpage sont les MTP, pour *Median Term Plan*, et les STP, pour *Short Term Plan* ; le premier s'étalant sur une durée d'environ un mois et le deuxième sur une durée d'environ une semaine. 35 MTP et 130 STP composent le jeu de données de VIRTIS.

4.3.1 Déroulement global de la mission

Du fait de la faible masse de la comète, Rosetta a accompagné 67P plus qu'elle n'a gravité autour, les équipes aux commandes de la sonde ayant dû ainsi réaliser d'innombrables manœuvres afin de rester à l'altitude souhaitée. Celle-ci n'a de plus pas été constante, en raison des différents objectifs voulu par les équipes des instruments (les équipes du RPC nous envoyant ainsi à plus de 1000 km !) mais surtout à cause des contraintes imposées par l'activité de la comète. Ainsi, deux phénomènes sont venus perturber la sonde : d'une part la pression du gaz s'échappant de la comète qui exerçait une pression importante sur les panneau solaire et d'autre part le trouble causé par les poussières à un *star-tracker* (instrument de navigation permettant le positionnement d'une sonde par rapport aux étoiles). Suite aux risques encourus, et notamment pendant la période proche du périhélie – activité et distance héliocentrique étant corrélées (voir figure 4.19), la sonde a dû rester à plusieurs dizaines voire centaines de kilomètres de la comète. L'altitude de Rosetta et la distance au Soleil du couple Rosetta/67P est représentée en fonction du temps et par MTP dans la figure 4.18.

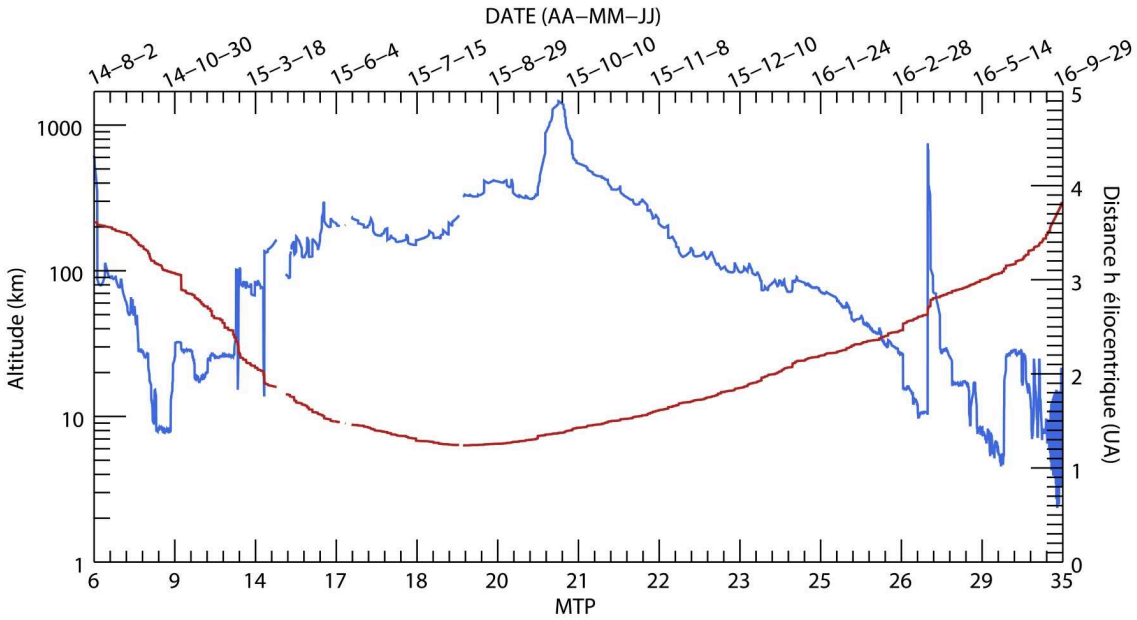


FIGURE 4.18 – Altitude de la sonde par rapport à 67P (bleu) et distance héliocentrique (rouge) au cours de la mission, entre le rendez-vous le 8 août 2014 et le crash contrôlé le 29 septembre 2016. Les données sont basées sur les calculs de la géométrie réalisés pour les observations VIRTIS.

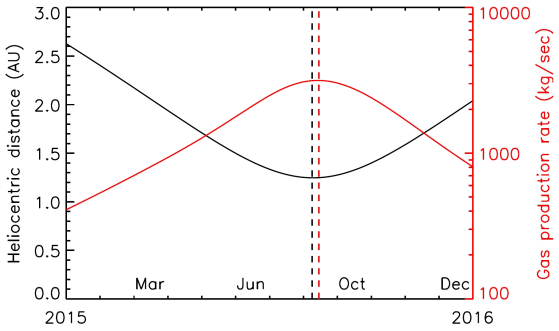


FIGURE 4.19 – Distance au Soleil et taux de production des gaz de 67P. Les traits verticaux représentent le maximum (taux de production) et le minimum (distance héliocentrique). Issue de **?**.

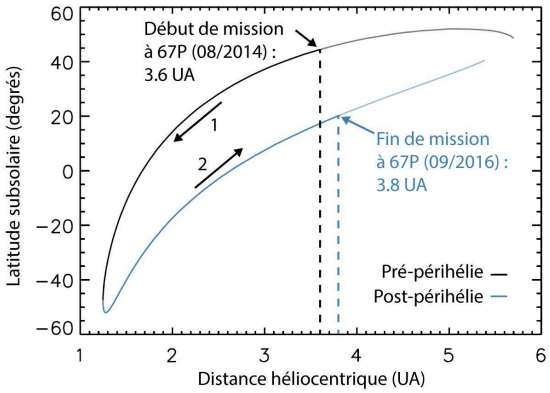


FIGURE 4.20 – Latitude sub-solaire en fonction de la distance héliocentrique. Adaptée de **?**.

La première contrainte sur l'altitude de la sonde, et sur la façon dont sont menées les observations, reste les objectifs scientifiques visés. Ainsi, il est possible de reconnaître dans la figure 4.18 plusieurs motifs : pendant MTP006 et MTP007, la sonde a pu s'approcher à moins d'une dizaine de kilomètres afin de cartographier l'hémisphère Nord de 67P (le seul éclairé à cette époque) mais aussi dans le but de repérer au mieux le site d'atterrissage de Philae. Après son largage, la sonde est restée à une distance proche de 20 à 30km jusqu'au printemps 2015 où elle a dû brusquement atteindre des orbites plus hautes, autour de 100 km et plus, afin d'éviter les problèmes d'orientations décrits précédemment. Par la suite, la comète se rapprochant du Soleil et voyant son activité augmenter, la sonde a dû être maintenu à plus de 100 km d'altitude de mi-2015 à fin 2015. Les deux excursions à environ 1000 km ont permis à RPC d'étudier l'environnement de la comète et son interaction avec le vent solaire (09/2015 et 04/2016). À partir de fin 2015 et jusqu'à l'été 2016, la sonde a pu entamer un lent rapprochement vers le noyau, l'activité diminuant. Enfin, en août-septembre 2016, les préparations orbitales pour la fin de mission et le crash contrôlé à la surface ont imposé de fortes contraintes, la sonde se rapprochant et s'éloignant successivement du noyau.

4.3.2 Conditions d'illumination du noyau et géométries d'observations

L'observation d'une surface planétaire est toujours soumise aux contraintes de la géométrie d'observation. Celle-ci est définie par les angles d'incidence, d'émergence et de phase (voir sous-section 5.2) et

est cruciale notamment pour les études photométriques (voir chapitre 5). Du fait de l'orbite particulière de Rosetta autour de 67P, orbite non circulaire et à distance variable notamment, la géométrie est extrêmement changeante selon les périodes de temps. Il est donc intéressant de retracer temporellement ces angles avant d'entamer l'étude des données et afin de synthétiser ces données pour un usage futur.

Il est important de noter que le calcul de la géométrie des observations est tributaire d'un modèle de forme. Plusieurs techniques basées sur les images de la caméra OSIRIS permettent de modéliser en 3D le noyau. Plus le nombre d'observations et surtout de géométries d'observations est grand, plus il est possible de reproduire un modèle détaillé et précis, représentatif de la réalité. Un modèle de forme est un assemblage de « facettes », ajustées les unes aux autres de manière à reproduire les reliefs du noyau. Au fur et à mesure de l'avancée de la mission, plusieurs modèles ont été construits : d'une résolution de plusieurs centaines de milliers de facettes pour le premier à près de 41 millions pour le dernier en date. Il n'est cependant pas nécessaire d'utiliser une telle précision pour le calcul de la géométrie et celle de VIRTIS a été générée au LESIA à l'aide du modèle de forme créé par l'équipe de Laurent Jorda au LAM et contenant environ 3 millions de facettes. Plus de détails concernant ces modèles de formes et la technique de modélisation sont disponibles dans Preusker, F. et al. (2015) et Jorda et al. (2016).

La figure 4.21 page 72, donne une carte de la densité des observations et les histogrammes des angles d'incidence, d'émergence, de phase et de la taille des pixels lors des observations VIRTIS-M infrarouge pour le MTP006. L'ensemble de ces figures, pour chaque MTP et pour les deux voies de l'instrument est donné en annexe 9.5.3 page 288. Les cartes de densité ne représentent pas les pixels à cheval sur le méridien 360° $\rightarrow$ 0° car l'algorithme utilisé les feraient recouvrir la carte. On remarque aussi des motifs s'expliquant par les reliefs : les flèches blanches des zones de plus fortes densités typiquement aux frontières des lobes, les flèches noires représentent des pixels relativement allongés. L'exemple typique de ce dernier cas est un pixel chevauchant des zones relativement éloignées et donc dont les quatre coins, utilisés dans la cartographie, possèdent un écart plus important. Pour plus de détails voir l'annexe 9.5.3 page 288.

4.3.3 Contraintes sur l'analyse du jeu de données

L'étude photométrique d'une surface se fait idéalement avec un jeu de données couvrant le maximum d'angles de phase (voir sous-section 5.3.6). Le but étant effectivement de construire une courbe de phase (voir 5.2) la plus complète possible (Jehl, 2008; Jehl et al., 2008). Pour cela, il est possible de combiner les multiples observations acquises avec des géométries différentes, mais par conséquent réalisées à des instants différents. Pour un corps sans atmosphère et avec une surface que l'on pourrait dire inerte, ne subissant pas ou peu de modifications de ses propriétés à l'échelle d'une mission spatiale (par exemple la surface d'un astéroïde ou de la Lune), cette technique fonctionne parfaitement. Mais cet artifice n'est pas anodin dans le cas d'une planète avec atmosphère (Mars) ou d'une comète observée pendant deux ans et demi sur 6 ans de révolution et qui plus est à son passage au périhélie. Les modifications potentielles que va subir la surface peuvent en effet influencer les propriétés de diffusion. Combiner des observations trop éloignées temporellement signifie alors mélanger des informations que l'on souhaite en réalité identifier, discriminer. La détermination d'un laps de temps pendant lequel on estime que la surface ne subit pas de

modifications majeures est donc une hypothèse nécessaire pour étudier la photométrie de la surface de 67P.

Cette première contrainte, nous obligeant à faire une hypothèse assez forte, est illustrée par les histogrammes des angles de phases des MTP006 à MTP012 utilisé dans la sous-section 5.4. Dans ces premiers mois de la mission on voit que les angles de phases s'étendent de 27° à 109°. Tandis que pour chaque MTP il est impossible de construire une courbe de phase suffisamment étendue pour en déduire les paramètres photométriques c'est au contraire en réunissant ces périodes comme expliqué ci-dessus et en considérant que l'activité est encore suffisamment faible pour ne pas induire de changement important à la surface, que l'on pourra mener à bien cette étude photométrique (voir 5.4).

Une autre contrainte est celle de l'orbite de la sonde dont l'altitude par rapport au noyau a énormément variée au cours de la mission (voir figure 4.18). La conséquence directe est bien sûr la variation de la résolution des observations ; celles-ci sont aussi reproduites dans les histogrammes des figures 9.5.3 page 288 en annexe. La résolution des observations n'a pas une influence directe sur un ou plusieurs paramètres des modèles utilisés en photométrie. Le problème est une question d'échelle à laquelle sont observés les détails de la surface. Les reliefs, influant sur les zones ombragées notamment, vont ainsi jouer de manières différentes sur le signal renvoyé vers l'instrument selon que la zone géographique à laquelle ils appartiennent est résolue ou non. Si dans nos observations nous ne sélectionnons que les zones éclairées et qu'une zone possédant beaucoup d'ombres en raison de la présence de reliefs est résolue, alors le « filtre » sera efficace, les zones d'ombres ne seront pas prises en compte. Mais si la même zone n'est couverte que par quelques pixels qui intègrent à la fois l'ombre et les zones éclairées, le signal reçu par l'instrument sera en moyen moins important. De manière générale, observer et étudier une surface à faible résolution aura tendance à homogénéiser ses propriétés photométriques. Cet aspect doit être pris en compte dans les observations de VIRTIS dont la résolution varie avec une amplitude non négligeable (de quelques mètres/pixel à plusieurs centaines parfois pour VIRTIS-M).

Enfin le dernier inconvénient pour mener une étude globale de la surface d'un corps planétaire, quelle qu'elle soit, est son éclairement au cours du temps. À partir du moment où l'objet en question possède une obliquité non nulle, les deux hémisphères seront à tour de rôle plongés dans une nuit polaire, très marquée dans le cas de 67P avec ses 52° d'obliquité. C'est l'hémisphère Nord qui était éclairé et fût donc couvert lors de la première et la dernière phase de la mission, tandis que l'hémisphère Sud était éclairé autour du périhélie (voir la latitude sub-solaire figure 4.20) et donc sur une période de temps très courte.

4.3.4 Suivi des observations et enrichissement de l'archive VIRTIS

Une mission étendue dans le temps telle que Rosetta permet de produire pour un instrument comme VIRTIS une quantité faramineuse de données qu'il est impossible d'analyser rapidement et au fur et à mesure de son déroulement. Pour faciliter le suivi des observations au fur et à mesure de la mission j'ai systématiquement créé une synthèse de chaque cube de données VIRTIS-H et VIRTIS-M, contenant pour VIRTIS-H comme pour VIRTIS-M (visible et infrarouge) :

— Une carte en projection cylindrique ainsi qu'une carte en projection orthogonale

— Le spectre moyen des pixels du noyau (pour VIRTIS-H, il s'accompagne de l'écart type pour chaque canal et sur l'ensemble des observations du cube)
— Une image à 0.55 µm ou 2.3 µm pour VIRTIS-M visible ou infrarouge respectivement ou le signal au cours du temps pour VIRTIS-H (à 2.35 et 4.31 µm)

La figure 4.22 illustre ces exemples pour VIRTIS-H et VIRTIS-M. L'intérêt est de pouvoir cibler un cube que l'on veut étudier plus en détails en parcourant rapidement une base de données contenant ces aperçus. Il est alors possible de voir le niveau du signal attendu, de choisir quelle acquisition étudier ou si un des ordres spectraux est saturé (pour VIRTIS-H), la couverture spatiale de l'observation ou encore sa qualité.

Ces données tout comme les cartes de densité (voir annexe 9.5.3) représentent un effort important de documentation du jeu de données VIRTIS et permettront d'enrichir l'archive. À terme, elles seront accessibles à travers le service VESPA/Europlanet disposant d'un protocole d'accès aux données EPN-TAP (facilitant l'accès à des données selon des critères qui leurs sont liés : géométries des observations, mode instrumentale utilisé...). Ce type d'exploitation a par ailleurs fait l'objet d'une participation dans Érard et al. (2017).

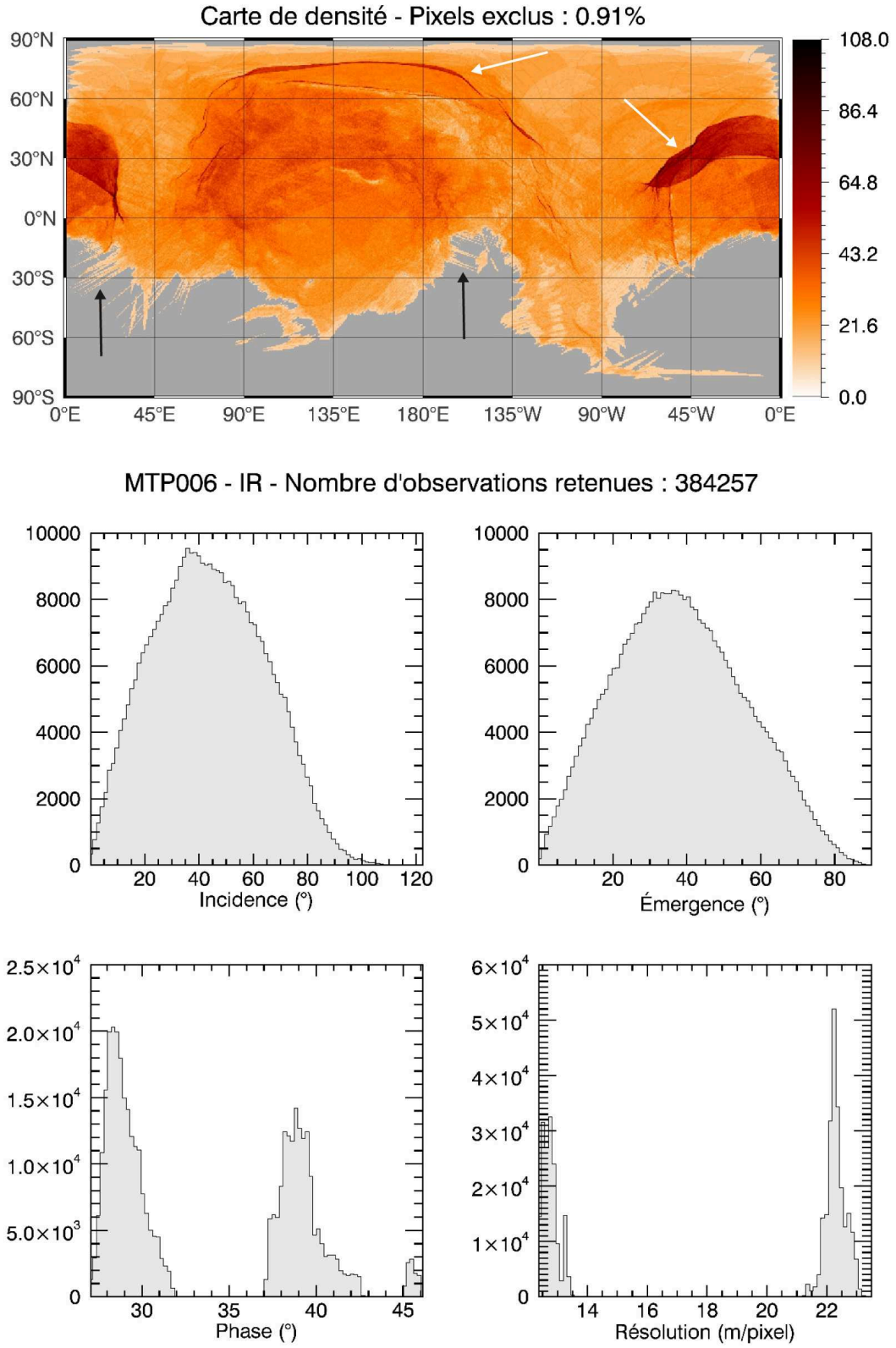
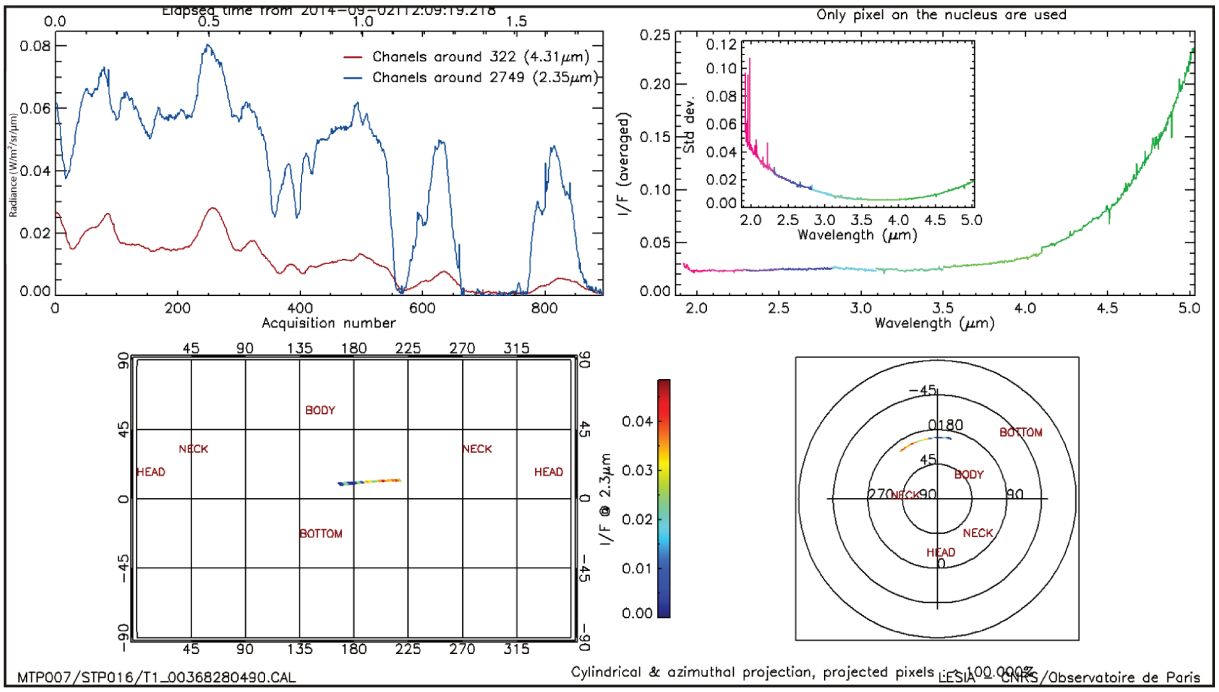
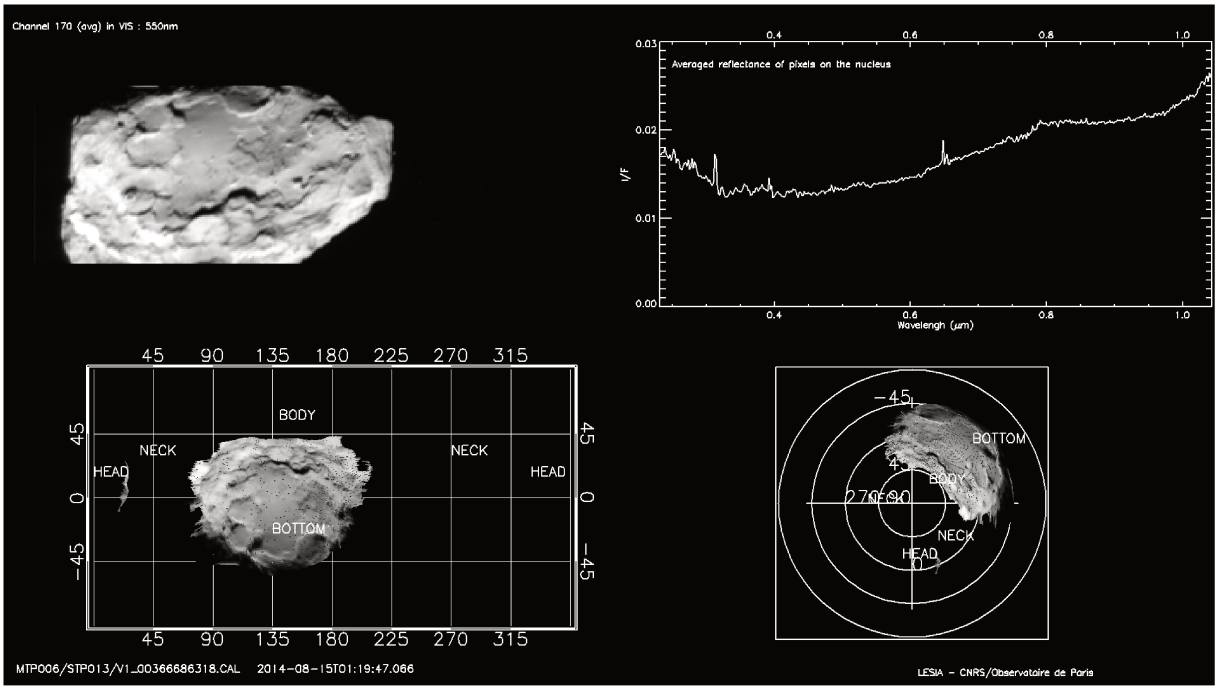


FIGURE 4.21 – Carte de densité et histogrammes des géométries d'observations et de leurs résolutions pour MTP006 et VIRTIS-M infrarouge. Le reste de ces données est consultable en annexe 9.5.3.



(a) Aperçu du cube VIRTIS-H MTP007/STP016/T1_00368280490



(b) Aperçu du cube VIRTIS-M visible MTP006/STP013/V1_00366686318

FIGURE 4.22 – Exemple « d'aperçus » pour VIRTIS-H et VIRTIS-M mise à disposition pour la communauté VIRTIS.

Chapitre 5

Étude des propriétés photométriques de la surface de 67P avec VIRTIS

5.1 Principe

Tandis que les interactions possibles à l'échelle microscopique seront détaillées dans la section 9.1 page 191 de la partie III, nous détaillerons ici les principes de la photométrie ainsi que les modèles et grandeurs associées utilisés dans la présente étude. Pour aller plus loin, le lecteur pourra consulter les thèses de A. Souchon, 2012, J. Fernando, 2014 (en français) ou l'ouvrage B. Hapke, 2012 (en anglais).

Le flux réfléchi par une surface dépend de ses propriétés, étudier la photométrie d'une surface permet alors, à travers des modèles adaptés, de déduire des informations sur celle-ci : composition au premier ordre, forme et taille des grains, porosité, rugosité... Cela se fait donc à partir de la mesure du flux émergent (provenant de la surface) tout en ayant connaissance du flux incident (provenant du Soleil) à la distance héliocentrique correspondante. VIRTIS permet donc effectivement cela puisqu'il mesure la lumière du Soleil qui a interagit avec la surface de 67P.

Dans une étude photométrique comme celle-ci, on tire parti de la diversité des géométries d'observation. En effet, en observant la même surface sous plusieurs angles différents, il est possible d'avoir une idée de la façon dont la surface diffuse la lumière. Une surface parfaitement réfléchissante comme un miroir renvoie ainsi la lumière dans une seule direction, dite spéculaire. C'est aussi le cas d'une surface liquide en grande partie et c'est ce qu'illustre le schéma de gauche de la figure 5.1. Une diffusion se faisant de façon isotrope correspond à une situation idéale – et peu réaliste dans la nature – d'une surface lambertienne (schéma du milieu figure 5.1). C'est en revanche ce type de propriété qui est recherché pour les cibles de référence lors de mesures en laboratoire puisque l'on cherche à apporter une correction pour rendre les observations indépendantes de l'angle d'incidence. Le cas le plus courant pour une surface planétaire est une situation intermédiaire où la diffusion/réflexion de la lumière se fera dans toutes les directions mais de façon anisotrope ; certaines diffuseront plus dans une direction donnée que dans une autre. De manière générale, les surfaces sombres ont tendance à rétrodiffuser (diffusion vers l'arrière, on

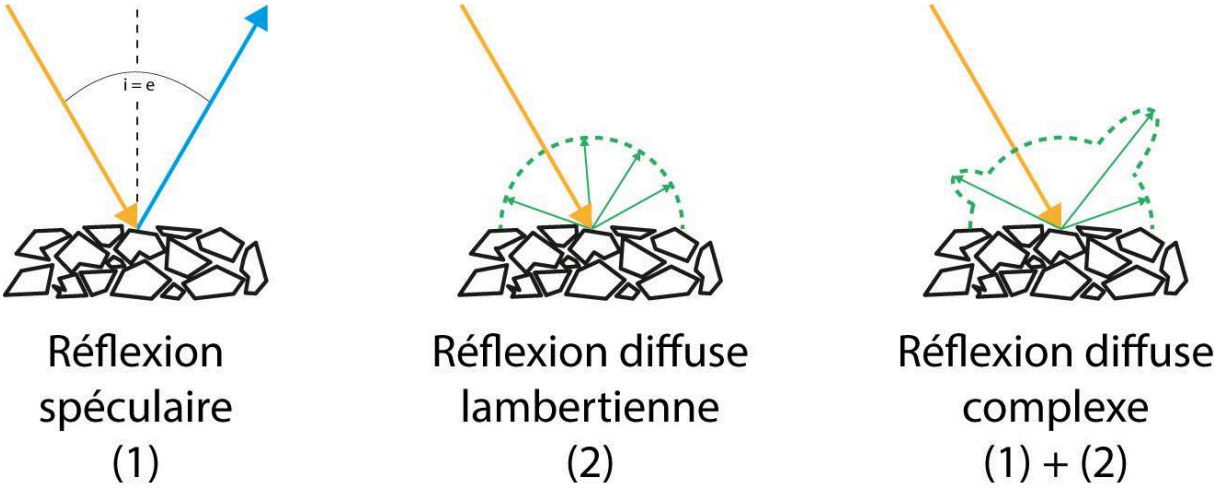


FIGURE 5.1 – Les différents types de diffusion. À gauche, la diffusion spéculaire prend place pour une surface très réfléchissante et lisse (miroir, lac calme...), l'énergie incidente est renvoyée dans une direction préférentielle. À l'inverse, aucune direction n'est favorisée dans la réflexion de type lambertienne. Un cas plus réaliste est la diffusion diffuse complexe, à droite. Dans cette situation, la lumière est renvoyée dans une ou deux directions préférentielles en plus d'une diffusion globale non négligeable.

parle de *backscattering* en anglais), et les surfaces claires (de glaces par exemple) à diffuser vers l'avant (*forward scattering*).

Le comportement photométrique d'une surface dépend de la longueur d'onde car il est dépendant de la taille des particules en surface. L'intérêt d'un imageur spectral est de donc de donner la possibilité d'étudier les différentes grandeurs photométriques en fonction de la longueur d'onde, c'est à dire de faire de la spectrophotométrie.

5.2 Grandeurs photométriques et concepts utiles

5.2.1 Géométrie d'observation

La géométrie d'observation est définie par les angles d'incidence (i), d'émergence (e), d'azimut (ψ) et de phase (g) (voir figure 5.2). A noter que l'on utilise souvent la convention de notation $\mu = \cos(e)$ et $\mu_0 = \cos(i)$.

L'angle d'incidence est l'angle formé entre la normale à la surface et le rayon provenant de la source, appelé rayon incident.

L'angle d'émergence (ou d'émission) est l'angle formé entre la normale à la surface et le rayon repartant de la surface, appelé rayon émergent.

L'angle d'azimut (ou azimut relatif) est l'angle entre la projection des plans d'incidence et d'émergence. Il est relié avec les autres angles par la relation : $\cos\psi = (\cos g - \cos i \cos e)/\sin i \sin e$

L'angle de phase est l'angle formé entre l'angle d'incidence et l'angle d'émergence. Il est donné par la relation suivante : $\cos g = \cos i \cos e + \sin i \sin e \cos\psi$

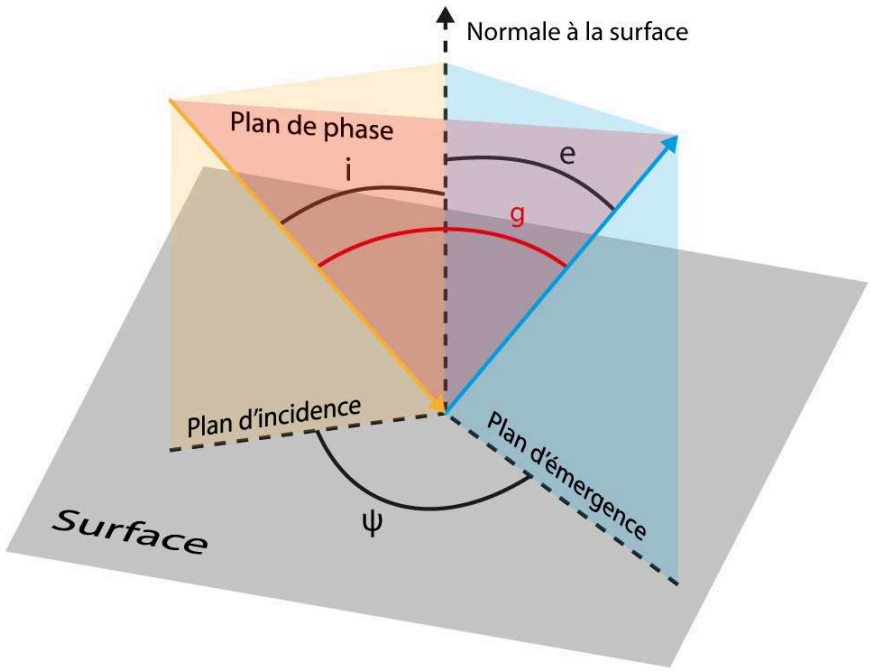


FIGURE 5.2 – Conventions d'angles utilisés en télédétection et notations utilisées dans cette étude. Le rayon incident est en jaune, l'émergent en bleu. Chacun forme l'angle d'incidence (i) et d'émergence (e) par rapport à la normale et la projection de leurs plans respectifs forme l'angle d'azimut (ψ). L'angle de phase est formé dans le plan contenant le rayon incident et émergent (voir texte pour la formule).

5.2.2 Mesure du flux

Le signal reçu par VIRTIS est calibré en une grandeur physique appelée luminance (ou *radiance* en anglais, terme que l'on utilisera par la suite). Elle représente une puissance rayonnée dans une direction donnée par élément de surface et par élément d'angle solide. L'unité est donc le $W.m^{-2}.sr^{-1}$. Dans certains cas, y compris celui de VIRTIS, une dépendance en longueur est présente pour donner ainsi des $W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$.

On utilisera cette grandeur pour un étude thermique alors qu'on préfèrera le facteur de radiance pour une étude de la surface et lorsque l'on s'intéresse à des longueurs non influencées par l'émission thermique. Le facteur de radiance (noté $\frac{I}{F}$) est sans dimension, il correspond à π que multiplie la luminance de l'objet, divisée par l'éclairement solaire qui tient compte de la distance héliocentrique de l'objet observé. Le facteur π correspondant à la luminance d'une surface lambertienne observée dans les mêmes conditions mais à incidence nulle. L'annexe 9.5.3 page 287 développe les détails de la calibration des données VIRTIS.

De nombreuses autres grandeurs peuvent être utilisées en télédétection ou en spectroscopie de laboratoire (notamment le facteur de réflectance, ou *Reflectance Factor*, utilisé dans la partie III). Pour connaître la version des fichiers de calibration VIRTIS utilisés dans cette étude, se rapporter à la section 4.2 ou à l'annexe 9.5.3 page 287.

5.2.3 Albédos

L'albédo permet de quantifier la proportion de lumière renvoyée par une surface ne produisant pas sa propre lumière. Plusieurs albédos ont été définis au cours du temps et on en distinguera principalement trois qui sont le plus souvent utilisés.

— L'albédo géométrique est défini comme le rapport entre l'intensité diffusé par un corps à angle de phase nul et l'intensité qu'aurait un disque lambertien (voir (2) figure5.1 pour une diffusion lambertienne) de diamètre équivalent à l'objet observé, et qui serait illuminé et observé selon sa normale et à la même distance.

— L'albédo de Bond, ~~James Bond~~, caractérise la proportion de lumière incidente qui est réfléchie par un corps planétaire selon tous les angles d'émissions (dans toutes les directions) et à une longueur d'onde donnée. On parle d'albédo bolométrique si cette quantité est intégrée spectralement.

— L'albédo de diffusion simple se rapproche de l'albédo de Bond mais pour une particule isolée. Il est défini comme le rapport entre l'énergie diffusée par la particule et l'énergie perdue lors de l'interaction (qui inclue énergie diffusée et absorbée) :

L'albédo de diffusion simple est un des plus utilisé en photométrie. Il se définit à partir des sections efficaces de diffusion (σ_S) et d'extinction (σ_E) d'une particule individuelle (voir partie III section 9.1 page 191) comme :

$$\omega = \frac{\sigma_S}{\sigma_E}$$

Bien que définie pour une particule, c'est bien une surface que l'on caractérise lorsqu'on étudie ce paramètre. La valeur calculée est donc une valeur moyenne. Dans tous les cas, l'albédo de diffusion simple est compris entre 0 et 1 : s'il vaut 0, il n'y a que de l'absorption, le grain/la surface ne renvoie pas de lumière ; s'il vaut 1, il n'y a que de la diffusion et la surface renvoie toute la lumière qu'elle reçoit. ω est fonction de la longueur d'onde et dépend des propriétés du matériau (donc de ses constantes optiques) et de la particule (forme, taille, structure interne).

5.2.4 Diffusion simple et diffusion multiple

La transmission de la lumière au sein d'un milieu particulaire peut se faire sur un chemin optique plus ou moins long selon que l'absorption est plus ou moins importante. Les modèles peuvent ainsi prendre en compte le fait que la lumière interagit avec plusieurs dioptres avant d'être absorbée ou avant qu'elle ne s'échappe de la surface (c'est le cas pour les chemins bleus du schéma de droite dans la figure 9.1 page 192 de la partie III). Dans ce cas on parle de diffusion multiple. Le matériau doit être suffisamment transparent pour ne pas absorber la lumière rapidement ; c'est le cas des glaces et des minéraux clairs comme le quartz dans les longueurs d'onde du visible et de l'infrarouge par exemple, hors des bandes d'absorption.

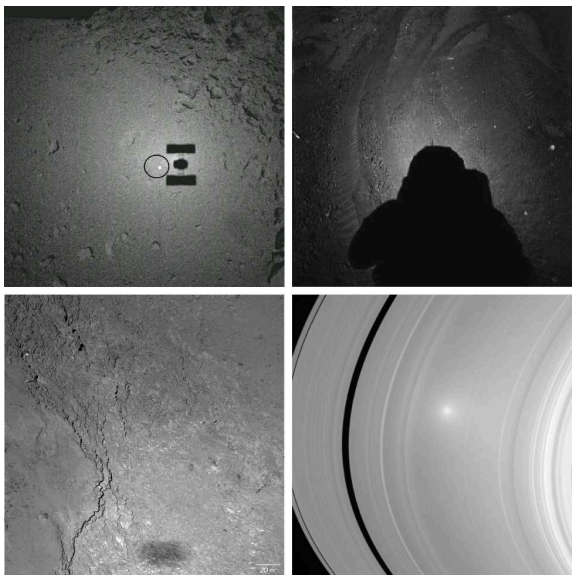
Pour des matériaux sombres, qui absorbe la lumière bien plus efficacement, il est souvent possible de faire l'hypothèse que le trajet optique des photons ne dépassera pas la taille d'un grain. Dans ce cas, la

lumière ne parcourt pas un chemin important dans la surface car elle est absorbée très rapidement. La diffusion multiple est alors négligeable si ce n'est nulle car les photons mesurés sont ceux qui n'ont pas pénétré le milieu. On parle de diffusion simple. Dans le cas d'une surface sombre comme le noyau de la comète 67P, c'est typiquement une hypothèse tout à fait réaliste.

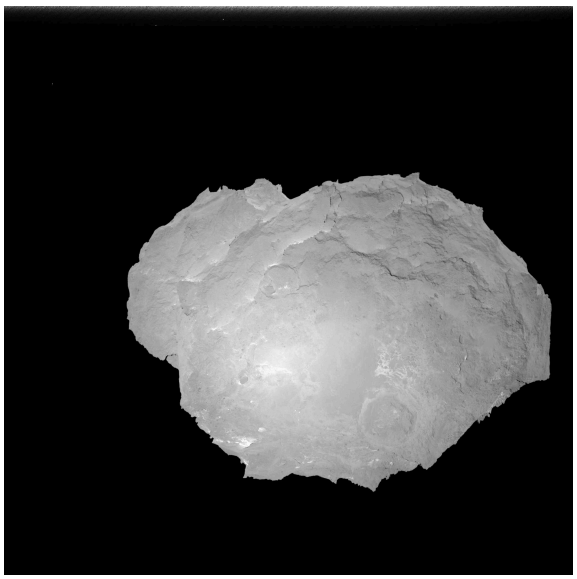
5.2.5 Effets d'opposition

L'effet d'opposition consiste en l'augmentation du signal renvoyé par une surface granulaire lorsque l'observation s'approche d'un angle de phase nul (source, observateur et cible sont alors alignés). Cette augmentation n'est pas linéaire et l'effet d'opposition n'est observable qu'à des angles de phase proche de 0°. La figure 5.3 illustre plusieurs cas d'effet d'opposition observés sur des régolites planétaires (Lune, comète, astéroïde...).

Deux mécanismes physiques possibles contribuent à l'effet d'opposition et sont utilisés et décrits dans le modèle de Hapke (1986, 2002) : l'effet d'opposition par masquage des ombres *(Shadow Hidding Opposition Effect - SHOE)* et l'effet d'opposition de retrodiffusion cohérente *(Coherent Backscattering Opposition Effect - CBOE)*. Le mécanisme du SHOE fait intervenir les ombres des grosses particules (par rapport à la longueur d'onde) à la surface. À mesure que l'angle de phase s'approche de zéro, celles-ci sont de moins en moins visibles car masquées par les particules elles-mêmes. Le deuxième mécanisme, le CBOE, a été introduit de façon à expliquer le pic de réflectance vers les angles de phase très proches de zéro ($\lesssim 1°$) principalement observé pour des milieux transparents et/ou clairs et dont la diffusion multiple a tendance a atténuer le SHOE. Le CBOE nécessite la diffusion multiple puisqu'il se base sur



(a) Effet d'opposition observé, de gauche à droite et de haut en bas : à la surface de l'astéroïde Itokawa (ISAS/Jaxa), de la Lune (Apollo 17 - NASA), de la comète 67P le 14/02/2015 (ESA/Rosetta/MPS/OSIRIS Team) et sur l'anneau A de Saturne (NASA/JPL/Space Science Institute).



(b) Survol de 67P le 9 avril 2016 à 30 km d'altitude. La résolution atteint 2.86 m/pixel. La tache brillante illustre parfaitement l'effet d'opposition dû à l'angle de phase très faible.

FIGURE 5.3 – Photographies illustrant l'effet d'opposition.

la formation d'interférences constructives formées par deux rayons ayant suivis des chemins optiques égaux mais opposés à travers le milieu.

5.2.6 Rugosité – Rugosité macroscopique

La rugosité d'une surface fait référence à sa topographie, qu'elle que soit l'échelle : du micromètre à plusieurs dizaines ou centaines de mètres. En télédétection on parlera de rugosité macroscopique pour désigner le paramètre intégrant l'ensemble des reliefs présents au sein du pixel et à toutes les échelles. L'adjectif macroscopique peut cependant être trompeur car une surface lisse à l'échelle du mètre possède tout de même une rugosité macroscopique. Cette rugosité ne peut être discriminée mais influe effectivement sur le signal reçu en fonction de la géométrie (i, e, g), il est donc nécessaire d'introduire dans les modèles de photométrie une fonction la prenant en compte.

Cette fonction est caractérisée par un paramètre $\bar{\theta}$ qui représente l'angle de pente moyen (la surface étant vu comme un ensemble de facette orientée différemment) et que l'on appelle donc la rugosité macroscopique comme l'a défini Hapke (1984). L'interprétation physique de ce paramètre reste délicat cependant car il intègre plusieurs échelles de rugosité . Il a ainsi été montré à plusieurs reprises que certaines échelles avaient une influence plus marquée, notamment les échelles millimétriques à centimétriques (Shepard and Campbell, 1998; Helfenstein and Shepard, 1999; Cord et al., 2003).

5.3 Modèles

De nombreux modèles permettent de décrire les propriétés photométriques d'un milieu tel qu'une atmosphère ou une surface :

— La théorie de Mie (Mie, 1908), qui s'applique à des particules sphériques isolées et allant jusqu'à des tailles de l'ordre de la longueur d'onde. Elle n'est donc pas destiné à l'origine à décrire une surface particulaire.

— La loi de Lambert (Lambert, 1760), empirique et simple car ne tenant pas compte de l'angle de phase. La réflectance sera simplement proportionnelle au cosinus de l'angle d'incidence. Des améliorations y ont été apporté par la suite ((Minnaert (Minnaert, 1941), Lambert-Lunaire (Meador and Weaver, 1975)).

— Les équations du transfert radiatif formulées par Chandrasekhar (1960) sont plutôt adaptées pour les atmosphères car elles décrivent les flux traversant un milieu absorbant et diffusant que l'on peut considérer comme un empilement de couches homogènes. Cependant, il est possible de l'utiliser pour une surface planétaire dans certains cas. La mise en place d'un tel modèle demande en revanche plus de ressources et est généralement plus complexe mais devient accessible aujourd'hui (Andrieu et al., 2015; Andrieu et al., 2015).

— On notera l'existence d'autres modèles comme celui de Douté et Schmitt (Douté, Sylvain and Schmitt, Bernard, 1998), plutôt adaptés pour les surfaces brillantes et se basant sur un milieu en couches ; le modèle de Shkuratov (Shkuratov et al., 1999), reposant sur un milieu à une dimension

et sur l'optique géométrique ne tient pas compte de la géométrie en raison de son formalisme et, bien qu'inversible, la nécessité de connaître la porosité du milieu ou la partie réelle de l'indice de réfraction pour connaître les absorptions ne le rend pas toujours adapté aux études comme la nôtre ; le modèle de Lumme et Bowell (Lumme and Bowell, 1981; Lumme and Bowell, 1981) prenant en compte, comme le modèle de Hapke, la porosité, la rugosité, la diffusion simple et multiple et permettant de décrire les propriétés photométriques d'une surface d'un corps sans atmosphère ou d'échantillons de laboratoire pour toutes les gammes d'albédos et d'angle de phase.

Ci-dessous, nous décrirons deux modèles particulièrement utilisé dans le domaine de l'analyse des surfaces planétaires et qui ont été utilisés dans cette étude : le modèle de Lommel-Seeliger et le modèle de Hapke. Pour plus de détails sur les autres modèles le lecteur est renvoyé vers les références ci-dessus ou vers la revue de Claustres (2000) (en français) et Souchon (2012).

5.3.1 Le modèle de Lommel-Seeliger

Le modèle de Lommel-Seeliger est un modèle empirique qui ne prend pas en compte la diffusion multiple et est donc plutôt adapté pour les surfaces sombres, c'est à dire dont l'albédo de diffusion simple est faible. Pour 67P, la Lune ou encore Mercure c'est donc un choix donnant une très bonne approximation des propriétés de diffusion de la lumière par leur surface.

Le modèle de Lommel-Seeliger dépend des angles d'incidence et d'émergence ainsi que de l'angle de phase à travers une fonction de phase $P(g)$. La réflectance r s'exprime de la sorte :

$$r(i,e,g) = \frac{\omega}{4\pi}\frac{\mu_0}{\mu_0+\mu}P(g) \tag{5.1}$$

On notera que cette loi ne prend pas en compte l'effet d'opposition, elle n'est donc pas adaptée pour décrire le comportement de diffusion d'un régolite pour les petits angles de phase ($\lesssim 5°$). Elle ne prend pas non plus en compte la rugosité de la surface contrairement au modèle de Hapke ci-dessous.

5.3.2 Le modèle de Hapke

Le modèle de Hapke est très utilisé en photométrie planétaire et B. Hapke le développe au cours d'une longue série d'articles (Hapke, 1981; Hapke and Wells, 1981; Hapke, 1984, 1986, 2002, 2008), notamment en ajoutant à celui-ci diverses fonctions qui permettent de prendre en compte des mécanismes physiques que les autres modèles ne prennent pas toujours en compte. C'est le cas de la diffusion multiple, de l'effet d'opposition (SHOE puis CBOE), de la rugosité macroscopique à travers la fonction d'ombrage et dans une dernière version de la porosité. Le modèle de Hapke dans sa dernière version (Hapke, 2008; Hapke, 2012) donne la réflectance comme suit :

$$r(i,e,g) = K\frac{\omega}{4\pi}\frac{\mu_{0e}}{\mu_{0e}+\mu_e}[P(g)B_{SH}(g)+H(\mu_{0e})H(\mu_e)-1]B_{CB}(g)S(i,e,g)$$

Dans cette équation on trouve les dépendances en cosinus d'angles d'incidence et d'émergence « effectifs » (μ_{0e} et μ_e – voir ci-dessous 5.3.3), en angle de phase (g), en albédo de diffusion simple (ω) en plus des paramètres/fonctions suivants : K est le paramètre de porosité (Hapke, 2008), $B_{SH}(g)$ et $B_{CB}(g)$ sont les fonctions prenant en compte les effets d'oppositions *(Hapke, 1986, 2002)*, $H(\mu_0)H(\mu)$ prend en compte la diffusion multiple (Hapke, 1981) et le fait que le paramètre de porosité ait été introduit (attention, c'est le cas pour l'expression dans Hapke (2008) mais pas dans la notation page 323 de Hapke (2012)). Ces trois derniers paramètres n'ont pas été étudiés dans cette étude et ne seront pas détaillés. En revanche, le choix d'une fonction de phase $P(g)$ est indispensable et la fonction d'ombrage $S(i,e,g)$ a été prise en compte dans certains cas. Ces fonctions seront donc développées ci-dessous.

5.3.3 La fonction d'ombrage

La fonction d'ombrage permet de tenir compte de la rugosité de la surface à travers le paramètre de rugosité macroscopique (Hapke, 1984; Hapke, 2012). Son interprétation physique et l'échelle où elle domine ont été discutées par de nombreux auteurs et restent de manière générale sujet à discussion. Si l'on exprime la réflectance d'une surface grâce à la formule 5.1 celle-ci ne tient pas compte de la rugosité, c'est une réflectance « lisse » $r_{lisse}(i_e,e_e,g)$ où les angles d'incidence et d'émergence « effectifs » ne tiennent pas compte non plus de la rugosité. La réflectance qui tient compte de la rugosité $r_{rug}(i,e,g)$ s'exprime alors comme :

$$r_{rug}(i,e,g) = r_{lisse}(i_e,e_e,g) \times S(i,e,g)$$

où $S(i,e,g)$ est la fonction d'ombrage. Afin de l'exprimer de façon plus commode, plusieurs fonctions sont définies préalablement :

$$\begin{aligned}
\chi(\bar{\theta}) &= \frac{1}{\sqrt{1+\pi\tan^2\bar{\theta}}} \\
E_1(x) &= \exp\left(-\frac{2}{\pi\tan\bar{\theta}\tan x}\right) \\
E_2(x) &= \exp\left(-\frac{1}{\pi\tan^2\bar{\theta}\tan^2 x}\right) \\
f(g) &= \exp\left(-2\tan\frac{g}{2}\right) \\
\eta(y) &= \chi(\bar{\theta})\left(\cos y + \sin y\tan\bar{\theta}\,\frac{E_2(y)}{2-E_1(y)}\right)
\end{aligned}$$

où x peut être l'angle d'incidence ou l'angle d'émergence selon les cas.

On distingue ensuite deux cas selon que l'angle d'incidence est supérieur ou égal à l'angle d'émergence.

Pour $e \geq i$:

$$\mu_{0e} = \cos i_e = \chi(\bar{\theta}) \left(\cos i + \sin i \tan \bar{\theta} \, \frac{\cos g \, E_2(e) + \sin^2(g/2) \, E_2(i)}{2 - E_1(e) - (g/\pi) E_1(i)} \right) \tag{5.2}$$

$$\mu_e = \cos e_e = \chi(\bar{\theta}) \left(\cos e + \sin e \tan \bar{\theta} \, \frac{E_2(e) + \sin^2(g/2) \, E_2(i)}{2 - E_1(e) - (g/\pi) E_1(i)} \right) \tag{5.3}$$

et

$$S(i,e,g) = \frac{\mu_e}{\eta(e)} \frac{\mu_0}{\eta(i)} \frac{\chi(\bar{\theta})}{1 - f(g) + f(g) \, \chi(\bar{\theta}) \, (\mu_0/\eta(i))} \tag{5.4}$$

Pour $e \leq i$:

$$\mu_{0e} = \cos i_e = \chi(\bar{\theta}) \left(\cos i + \sin i \tan \bar{\theta} \, \frac{E_2(i) + \sin^2(g/2) \, E_2(e)}{2 - E_1(i) - (g/\pi) E_1(e)} \right) \tag{5.5}$$

$$\mu_e = \cos e_e = \chi(\bar{\theta}) \left(\cos e + \sin e \tan \bar{\theta} \, \frac{\cos g \, E_2(i) + \sin^2(g/2) \, E_2(e)}{2 - E_1(i) - (g/\pi) E_1(e)} \right) \tag{5.6}$$

et

$$S(i,e,g) = \frac{\mu_e}{\eta(e)} \frac{\mu_0}{\eta(i)} \frac{\chi(\bar{\theta})}{1 - f(g) + f(g) \, \chi(\bar{\theta}) \, (\mu_0/\eta(e))} \tag{5.7}$$

5.3.4 Les fonctions de phases

La diffusion de la lumière par une particule, qui dépend des propriétés du matériau dont elle est constituée, se fait selon une distribution angulaire continue mais dont certaines directions sont privilégiées. La fonction de phase introduite dans les modèles de photométrie présentés précédemment permet de caractériser la distribution spatiale de cette lumière diffusée. Plus précisément, elle quantifie « la probabilité pour qu'un photon soit dévié d'un angle $180 - g$ [...] par rapport à sa direction initiale » (Souchon, 2012).

Les polynômes de Legendre ou les fonctions de Henyey-Greenstein (HG) sont des fonctions de phase utilisables dans l'étude de la photométrie des milieux particulaires. Ce sont ces dernières qui sont les plus répandues et qui ont été utilisées dans cette étude. Les fonctions de Henyey-Greenstein sont à l'origine utilisées pour l'étude de la diffusion de la lumière par la poussière du milieu interstellaire (Henyey and Greenstein, 1941) mais sont largement répandues pour l'étude des surfaces planétaires particulaires car elles permettent de décrire la forme de courbes de phase variées avec un ou deux paramètres. Ci-dessous sont décrites les deux fonctions de Henyey-Greenstein les plus utilisés.

Le nombre de lobes de diffusion (un ou deux) et les paramètres d'asymétrie définissent plusieurs familles de fonctions Henyey-Greenstein. La fonction HG1 comporte ainsi un lobe de diffusion qui est

décrit par le paramètre $b \in [-1,1]$, dit paramètre d'asymétrie, et dont la valeur caractérise la propension des particules à diffuser la lumière vers l'avant (« *forward scattering* », $b \in [0,1]$) ou vers l'arrière (« *backscattering* »,$b \in [-1,0]$) :

$$P_{HG1}(g,b) = \frac{1-b^2}{(1+2b\cos g+b^2)^{3/2}} \tag{5.8}$$

La fonction HG2 suppose deux lobes de diffusion caractérisés par le même paramètre d'asymétrie. Ici, deux termes permettent de décrire pour l'un la diffusion vers l'avant et pour l'autre la diffusion vers l'arrière grâce au paramètre c appelé fraction de rétrodiffusion sur lequel il n'existe pas de contrainte hormis le fait que la fonction de phase dans sa globalité doit être positive ou nulle. La diffusion se fait majoritairement vers l'avant si $c < 0.5$ et majoritairement vers l'arrière si $c > 0.5$.

$$P_{HG2}(g,b,c) = c\frac{1-b^2}{(1+2b\cos g+b^2)^{3/2}} + (c-1)\frac{1-b^2}{(1-2b\cos g+b^2)^{3/2}} \tag{5.9}$$

L'utilisation d'une fonction de Henyey-Greenstein HG3 dans laquelle deux paramètres d'asymétries caractérisent chaque lobe n'est justifié que si l'on dispose d'un jeu de données dans lequel les angles de phases couvrent une gamme très large ($\geq 130°$) (Hartman and Domingue, 1998). Ce n'est pas le cas du jeu de données de VIRTIS

5.3.5 Limites

Avant toute utilisation d'un modèle de photométrie (et plus généralement de n'importe quel modèle), il est important de cerner le cadre théorique dans lequel il est valable, de connaître ses limites et le domaine de validité. L'avantage de la version complète du modèle de Hapke est de prendre en compte divers phénomènes physiques. L'inconvénient est en revanche d'utiliser des paramètres dont la signification et la modélisation n'est pas toujours claire et que ces paramètres restent discutés (Shepard and Helfenstein, 2007; Shkuratov et al., 2012). En ajuster autant dans un modèle complexe est une source d'incertitudes qu'il est important de caractériser dans des études dédiées (Schmidt and Fernando, 2015).

Dans ces conditions il est possible voire parfois souhaitable d'utiliser un modèle simplifié selon l'objet observé. Par exemple, utiliser le modèle de Hapke dans sa version complète n'est pas nécessaire dans notre cas car la couverture en angle de phase ne permet de déterminer les paramètres liés à l'effet d'opposition et à la porosité par exemple (Helfenstein et al., 1988; Li et al., 2013). De même, il s'avère inutile de considérer la diffusion multiple pour un corps aussi sombre que 67P et ce terme est donc lui aussi mis de côté.

En résumé le modèle utilisé ici est un modèle de Hapke simplifié (ou un modèle de Lommel-Seeliger tenant compte de la rugosité), qui exprime la réflectance comme suit :

$$r(i,e,g) = \frac{\omega}{4\pi}\frac{\mu_0}{\mu_0+\mu}P_{HG1}(g)S(i,e,g) \tag{5.10}$$

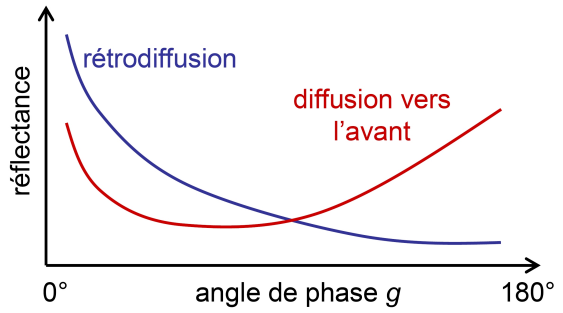
Un modèle largement utilisé dans la communauté signifie aussi qu'il est discuté à maintes reprises et dans différents contextes (amélioration ou adaptation, étude sur différents matériaux, simulation numérique ; Shepard and Campbell (1998); Douté, Sylvain and Schmitt, Bernard (1998); Poulet et al. (2002); Cord et al. (2003); Shkuratov et al. (2005); Shepard and Helfenstein (2007); Helfenstein and Shepard (2011); Shkuratov et al. (2012); Ciarniello et al. (2014); Yoldi et al. (2015); Schmidt and Fernando (2015)). D'autant que malgré son efficacité à décrire le comportement photométrique des surfaces il souffre aussi de problèmes non encore résolus ou peu clairs. Récemment, le développement de simulations en tracé de rayons parfois couplées à une approche Bayésienne permet des études sur des « jeux de données virtuels » conséquents. Schmidt and Fernando (2015) ont ainsi étudié les incertitudes liés aux paramètres ω, b, c et $\bar{\theta}$ dans différentes géométries (géométrie unique, acquisition dans le plan principal, azimut fixe ou variable...) permettant de mettre en évidence les situations favorables ou défavorables à la détermination de ces paramètres ainsi que les problèmes de non-linéarité du modèle ou le lien étroit entre b et c. L'étude de Ciarniello et al. (2014) permet quant à elle de tester différentes versions du modèle de Hapke afin de déterminer dans quels cas elles sont les plus efficaces. Ainsi, alors que c'est une des versions les moins utilisées aujourd'hui, celle de 2008 prenant en compte la porosité du milieu semble la plus à même pour décrire les surfaces planétaires de nombreux objets présentant une porosité (comètes, astéroïdes, Lune, Mars sur certains régions). Cela s'explique néanmoins par le fait qu'elle nécessite des observations à faible angles de phase, ce qui n'est pas toujours le cas lors des missions spatiales.

Enfin il est important de prendre en compte les limitations d'un tel modèle. Le modèle de Hapke est ainsi valable dans le cadre de l'optique géométrique, c'est à dire lorsque la taille des particules est grande devant la longueur d'onde. Il ne traite donc pas avec les particules très petites ou du même ordre de grandeur. La variation de ses paramètres avec la longueur d'onde est également un des points qu'il reste à étudier en profondeur. Dans certains cas, c'est le jeu de données lui-même qui ne se prête pas à son application : déterminer des paramètres photométriques d'une région présentant des hétérogénéités non résolues par l'observation conduira à des résultats peu cohérents.

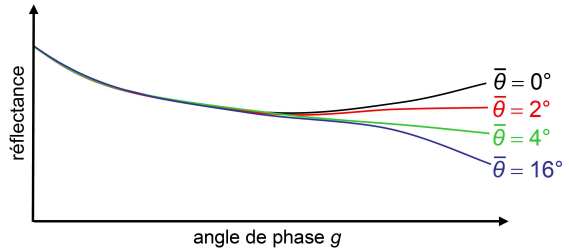
Sur un objet comme 67P et en raison de l'orbite de Rosetta, le problème peut se poser de la variation de résolution des observations. Il est donc nécessaire d'être prudent lors de la comparaison entre plusieurs périodes aux orbites très différentes. Du point de vue de l'interprétation, les reliefs très prononcés provoquant des géométries extrêmes sont courants sur 67P ; là encore il peuvent également induire des valeurs extrêmes pour certains des paramètres. Enfin, comme on va le voir ci-dessous, les contraintes orbitales/observationnelles imposent une géométrie particulière et nous oblige à faire des compromis.

5.3.6 Méthode utilisée pour la dérivation des paramètres photométriques

Étudier la photométrie d'un terrain nécessite d'avoir une gamme d'angles de phase suffisamment large pour construire une courbe de phase complète (la courbe de phase étant simplement la représentation de la réflectance en fonction de l'angle de phase). Plus cette gamme est étendue, plus la détermination des paramètres photométriques sera précise et cohérente (Jehl, 2008; Jehl et al., 2008). En effet, chacun des paramètres influe sur cette courbe : tandis que l'albédo de diffusion simple jouera sur le niveau global de la réflectance, le paramètre b influe sur la forme de la courbe de phase. Une diffusion vers l'avant



(a) Effets de la diffusion vers l'avant et de la rétrodiffusion sur la réflectance.



(b) Effet de $\bar{\theta}$ sur la courbe de phase. Plus le terrain est lisse, plus $\bar{\theta}$ est petit, plus la réflectance est grande à phase élevée.

FIGURE 5.4 – Effet de la fonction de phase et de la rugosité macroscopique sur la réflectance (représentations schématiques, repris de Souchon (2012)).

$(0 < b < 1)$ donne une réflectance plus faible aux petits angles de phase et plus importante aux grands angles de phase relativement au cas d'une rétrodiffusion $(-1 < b < 0)$ où la réflectance est alors plus importante aux petits angle de phase et plus faible aux grands (voir figure 5.4a). Le paramètre $\bar{\theta}$ contrôle la réflectance à incidence rasante uniquement puisque c'est aux grandes phases ($> 90°$ environ selon les surfaces), et donc à i plus grand pour e fixe, que l'effet des ombres du relief sera visible. Si ce dernier est important, correspondant à un terrain rugueux, $\bar{\theta}$ est grand et la réflectance plus faible à ces grands angles de phase, si le terrain est plutôt lisse, $\bar{\theta}$ est faible et la réflectance plus importante dans cette même gamme (voir figure 5.4b).

Au cours de la mission Rosetta, les géométries d'observations ont été très diverses et il est alors possible de combiner les observations réalisées à des temps différents afin de construire une courbe de phase suffisamment complète. Si celle-ci va de 20° à au moins 100° cela laisse la possibilité de déterminer les trois paramètres inconnus du modèle utilisé (voir équation 5.10).

Dans ce cas, la procédure suivie est la suivante, identique à celle définie par Ciarniello et al. (2015) :

1. À partir d'un jeu de données, seules les observations dont l'incidence et l'émergence sont inférieures à 60° sont gardées afin d'éviter une trop grande dispersion de la réflectance engendrée par les géométries plus extrêmes et pour rester dans le domaine où le modèle fonctionne raisonnablement bien.

2. L'équation 5.10 donne :

$$\frac{I}{\pi F} = \frac{\omega}{4\pi} \frac{\mu_{0e}}{\mu_{0e} + \mu_e} P_{HG1}(g) S(i,e,g)$$

   où seuls ω, b (dans $P_{HG1}(g)$) et $\bar{\theta}$ sont inconnus ; μ_{0e}, μ_e et $S(i,e,g)$ sont données par les équations 5.2 à 5.7.

3. On construit alors l'expression suivante pour une longueur d'onde donnée et pour chaque observations :

$$\frac{I}{F} \times 4 \frac{(\mu_{0e} + \mu_e)}{\mu_{0e} S(i,e,g)} = \omega P_{HG1}(g) \tag{5.11}$$

Dans ce premier cas, la fonction $S(i,e,g)$, qui dépend également de $\bar{\theta}$ est calculé avec une valeur initiale quelconque de ce paramètre pour une première évaluation. $\frac{I}{F}$ est ici l'expression de la réflectance telle qu'elle est fournie dans les données calibrées de VIRTIS.

4. La fonction $\omega P_{HG1}(g)$ est moyennée par tranche de 1° d'angle de phase puis le modèle est ajusté à la courbe obtenue afin d'en déduire les paramètres ω et b. L'erreur sur la valeur de $\omega P_{HG1}(g)$ est donnée comme étant l'écart type de la distribution, divisée par le nombre d'observations dans la tranche de 1° degré considérée. Cela permet de contraindre l'ajustement et de minimiser l'erreur finale sur les paramètres calculés.
5. Cet ajustement est réalisé pour chaque longueur d'onde pour une valeur de $\bar{\theta}$ donnée.
6. Puis l'ensemble de la procédure est répété en faisant varier $\bar{\theta}$ dans une gamme déterminée, de 0° à 40°. La valeur des paramètres ω, b et $\bar{\theta}$ est gardée lorsque le χ^2 est le plus faible.

L'erreur calculée pour la détermination de la meilleure valeur de $\bar{\theta}$ se base sur l'estimation du χ^2 en fonction de $\bar{\theta}$ et à une longueur d'onde donnée. L'erreur totale, ou résidu, est estimée sur une gamme de longueur d'onde s'étalant de 0.55 µm à 0.8 µm pour le visible et de 1 µm à 2 µm pour l'infrarouge et ce afin d'éviter les erreurs importantes liées au bruit dans les petites longueurs d'onde et au signal thermique dans les grandes longueurs d'onde pour la voie infrarouge. Ce qui donne alors :

$$Res_{VIS}(\bar{\theta}) = \sum_{\lambda=0.55\,\mu\text{m}}^{0.8\,\mu\text{m}} \chi^2_\lambda(\bar{\theta})$$

$$Res_{IR}(\bar{\theta}) = \sum_{\lambda=1\,\mu\text{m}}^{2\,\mu\text{m}} \chi^2_\lambda(\bar{\theta})$$

5.4 Étude à l'échelle globale

On a pu voir en section 4.3.3 qu'une étude photométrique nécessite une couverture en angle de phase relativement importante. Lorsque l'on étudie le jeu de données VIRTIS-M à travers les figures de l'annexe 9.5.3, on s'aperçoit qu'il n'est pas possible de dériver l'ensemble des paramètres photométriques sur des temps et sur des zones restreintes (à l'échelle d'un MTP par exemple). Une des solutions serait de considérer certains de ces paramètres constants au cours du temps et d'étudier le comportement d'un seul paramètre. C'est le cas de $\bar{\theta}$ qui dépend du relief et donc de la morphologie de la surface. *A priori*, on peut s'attendre à ce qu'il ne subisse pas de changements majeurs et il peut alors être considéré comme constant, bien que cela puisse se discuter localement et à une échelle centimétrique ou décimétrique.

Il n'en est pas de même pour ω et b. En effet, au cours du temps et à mesure que la comète se rapproche puis s'éloigne du périhélie, son activité, qui est liée à la sublimation des glaces présentes à l'intérieur du noyau, entrainent le soulèvement des poussières en surface. Il y a donc un rajeunissement de celle-ci et les propriétés du matériau de surface peuvent donc évoluer au cours du temps. Or, si ces propriétés varient, les paramètres photométriques vont également varier. C'est le cas de ω et de b, dépendants tous

deux de la nature du matériau observé. Il paraît alors délicat de fixer un de ces deux paramètres pour étudier le comportement de l'autre.

Malgré ces contraintes, on peut réaliser une étude globale sous certaines hypothèses. Entre le MTP006 et le MTP012 on balaye ainsi majoritairement l'hémisphère Nord de 67P et l'angle de phase varie suffisamment pour construire une courbe de phase complète (voir figure 4.21). Il est alors possible de déterminer ω, b et $\bar{\theta}$ qui représenteront le comportement moyen de la surface. Ensuite, il est possible d'inverser le modèle et de déterminer ω pour chaque pixel mais en faisant l'hypothèse que b et $\bar{\theta}$ sont constant sur toute la surface. Ce qui est raisonnable pour $\bar{\theta}$ mais probablement moins pour b comme nous le discuterons par la suite.

La deuxième hypothèse pour une telle étude est de considérer la variabilité de ces paramètres dans le temps comme négligeable dans l'intervalle étudié. Celle-ci est raisonnable car l'activité de la comète sur la période allant de août 2014 à fin janvier 2015 reste faible (Marshall et al., 2017). Le taux de production en eau atteint ainsi en janvier 2015 seulement 2% de son maximum sur l'ensemble de la mission (N.Biver, communication personnelle).

5.4.1 Incertitudes et données retenues

Les données utilisées dans cette étude globale (couvrant les périodes de MTP06 à MTP012) respectent certains critères qui permettent de limiter la dispersion des valeurs de réflectance gardées pour ajuster le modèle. Les angles d'incidence et d'émergence supérieurs à 60° ne sont ainsi pas conservés et un seuil minimum est appliqué pour la réflectance : fixé à 0.001 pour le canal visible et à 0.005 pour le canal infrarouge. Les valeurs restantes sont représentées sous forme de carte et d'histogramme dans les figures 5.5 et 5.6 et les réflectances à 0.55 µm pour le visible et 2.3 µm pour l'infrarouge sont représentées en fonction des angles de phases balayés dans les figures 5.7 et 5.8. On retient environ 925 000 et 743 000 pixels pour le canal visible et infrarouge respectivement, soit un total de 1 668 000 pixels. C'est moins que l'étude menée par Ciarniello et al. (2015) (2 100 000 observations) sans doute en raison des divers filtres appliqués aux traitements des cubes hyperspectraux mais cela forme de toute façon un échantillon statistique amplement suffisant pour mener une telle étude. L'application de ces filtres sur les données courant de MTP006 à MTP012 diminue drastiquement la couverture spatiale et le nombres d'observations (pixels) retenu. Cela est particulièrement visible en comparant la couverture spatiale des figures 5.5 et 5.6 avec la figure 4.21.

Les incertitudes sur les estimations des paramètres photométriques présentés ci-dessous ne sont pas tracées car toujours négligeables ($< 10^{-4}$). Comme expliqué dans la section 5.3.6 les ajustements sont contraints dans chaque tranche de 1° d'angle de phase par l'erreur type. Celle-ci est définie comme l'écart type de la distribution dans cette tranche divisé par le nombre d'éléments contenus dans cette même tranche. Ce nombre étant très important (moins pour VIRTIS-H) d'après la quantité d'observations utilisées, l'erreur est très faible. Ce choix est donc lié aux nombres de données disponibles et n'aurait pas été possible avec une faible quantité d'observations subissant une dispersion importante. On verra dans la sous-section 5.4.5 que l'utilisation de cette définition de l'erreur ne permet pas la détermination

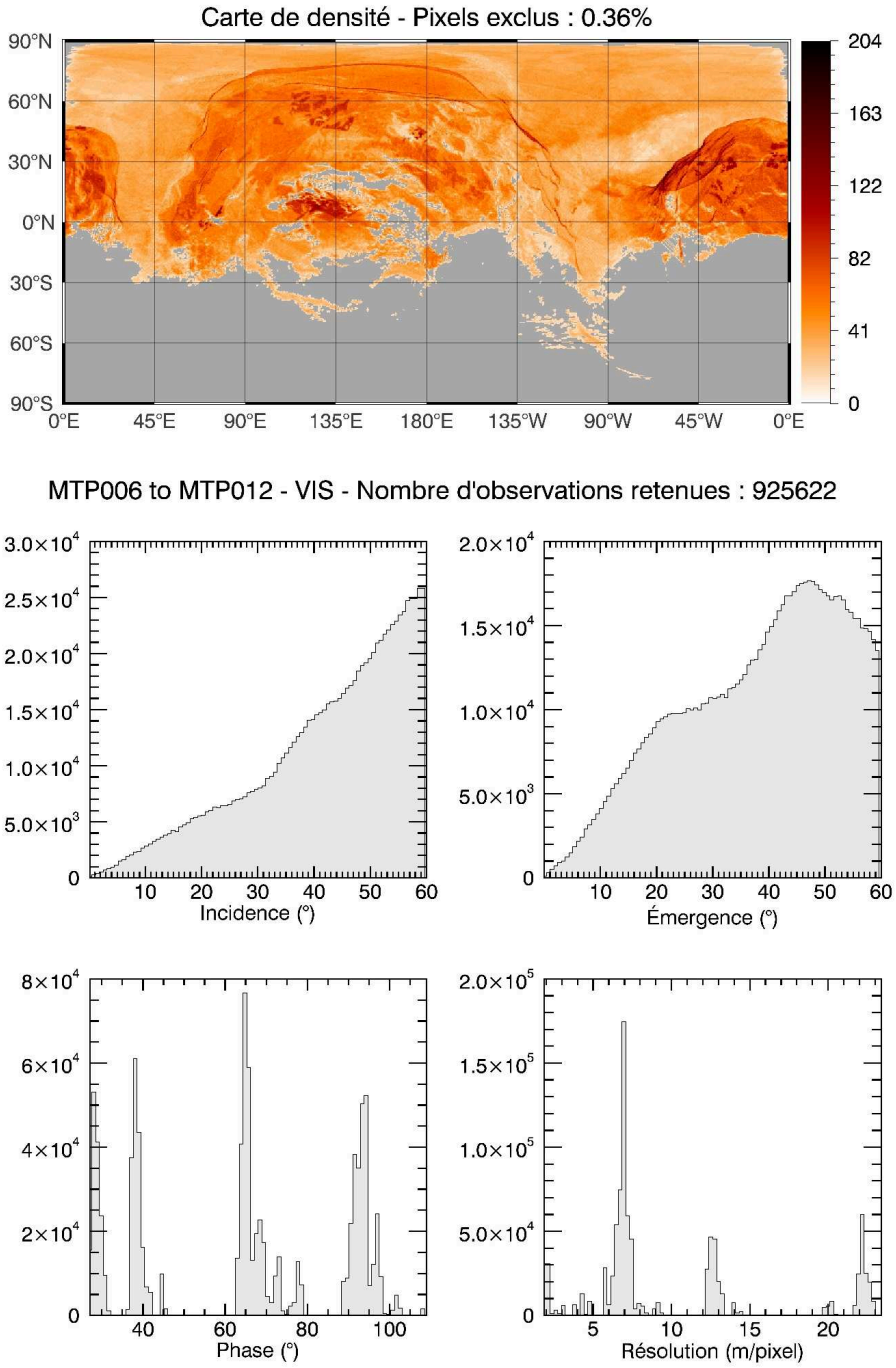


FIGURE 5.5 – Observations VIRTIS-M visible retenues pour l'étude des paramètres photométriques. Pour les détails concernant la réalisation des cartes de densité, voir 9.5.3.

de la rugosité macroscopique. On utilisera alors l'écart type de la distribution dans chaque tranche de 1° comme erreur plutôt que l'erreur type.

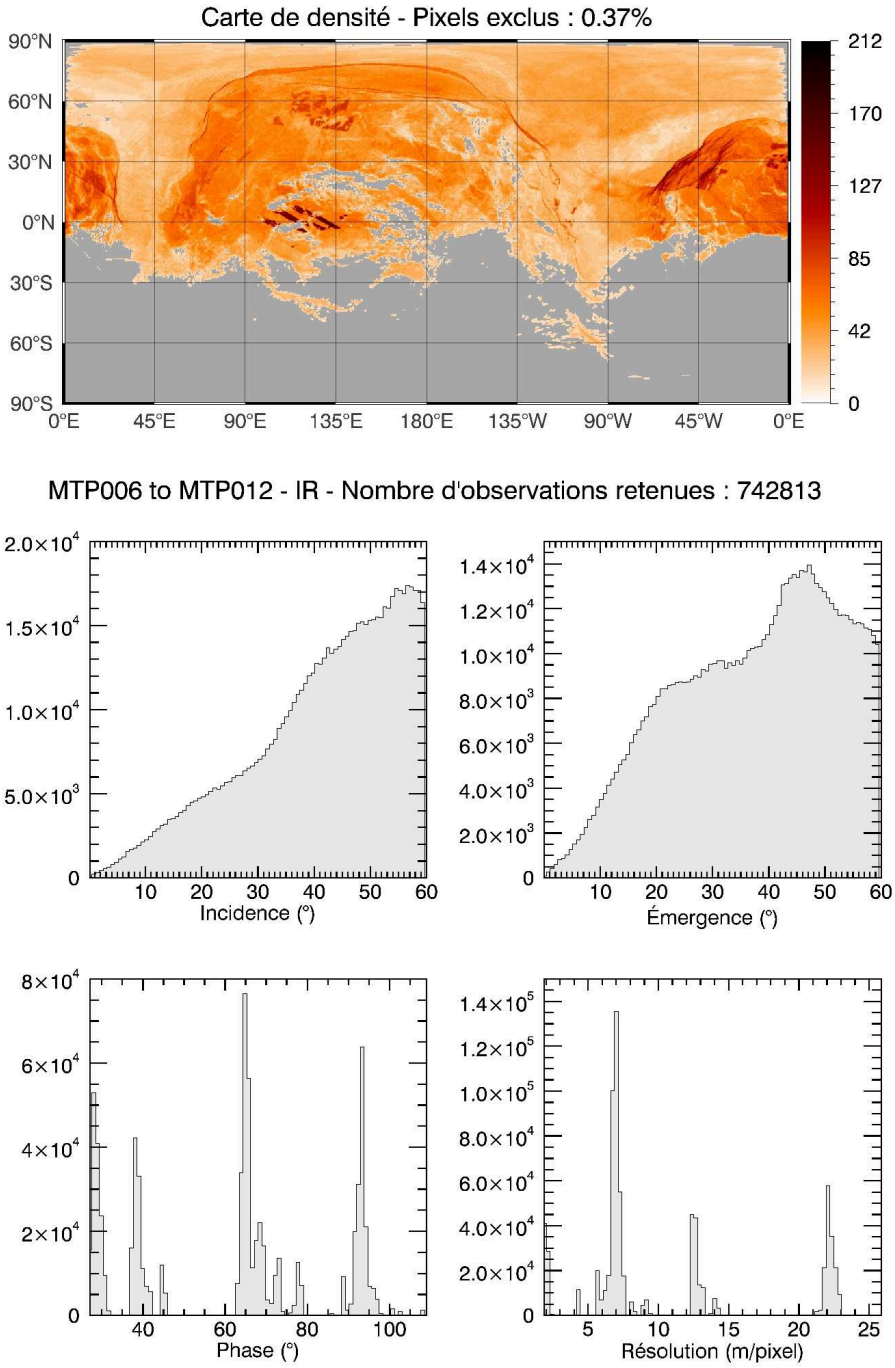


FIGURE 5.6 – Observations VIRTIS-M infrarouge retenues pour l'étude des paramètres photométriques. Les trois bandes à forte densité visibles autour de la l'équateur et aux longitudes courant entre 90°E et 135°E sont au MTP008 qui concentre des observations proches du noyau et donc à hautes résolutions (voir MTP007 pour VIRTIS-M infrarouge en annexe 9.5.3). Pour les autres détails concernant la réalisation des cartes de densité, voir 9.5.3.

5.4.2 Détermination du paramètre $\bar{\theta}$

Comme détaillé dans la sous-section 5.3.6, on cherche l'ajustement qui donne le χ^2 le plus faible pour chaque valeur discrétisée de $\bar{\theta}$. Pour VIRTIS-M visible et infrarouge les figures 5.9 et 5.10 représentent

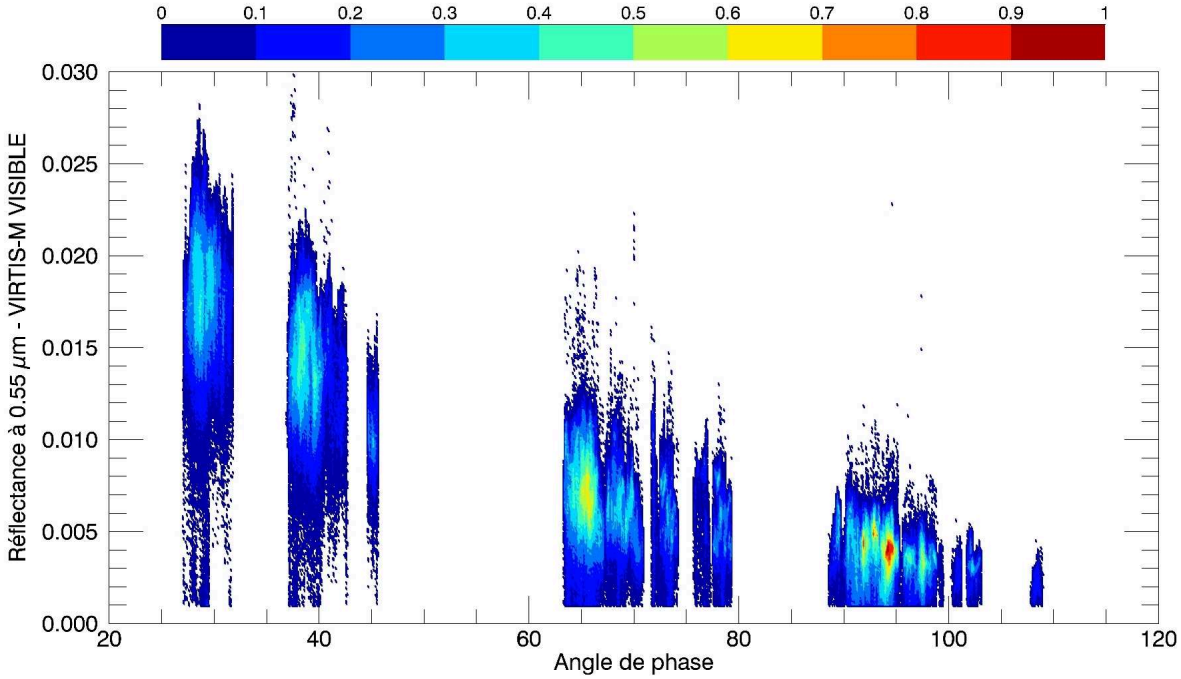


FIGURE 5.7 – Densité (échelle normalisée) de la réflectance moyennée sur 10 canaux autour de 0.55 µm des observations VIRTIS-M visible retenues pour l'étude photométrique couvrant MTP006 à MTP012.

les valeurs de la fonction $\omega P_{HG1}(g)$ (voir équation 5.11) avec différentes valeurs de $\bar{\theta}$ et le χ^2 total normalisé à sa valeur à l'origine associé à chaque itération.

On trouve $\bar{\theta} = 19.5°$ avec le canal visible et $\bar{\theta} = 18°$ avec le canal infrarouge. L'erreur sur ces valeurs peut être estimée de la même façon que Ciarniello et al. (2015), c'est à dire en déterminant un seuil basé sur la sensibilité du résidu aux valeurs $\bar{\theta}$ les plus faibles. Ainsi, jusqu'à $\bar{\theta} \approx 9°$, la courbe n'est pas sensible à la variation de $\bar{\theta}$, elle le devient après : c'est à cette valeur de $\bar{\theta}$ que l'on définit le seuil. À niveau équivalent on tombe sur $\bar{\theta} = 24.5°$ pour les valeurs de $\bar{\theta}$ supérieures à la valeur déterminée. On applique la même méthode à $\bar{\theta}$ calculé dans l'infrarouge pour obtenir finalement :

$$\bar{\theta}_{VIS} = 19.5^{+5}_{-10.5}\,;\ \bar{\theta}_{IR} = 18^{+3.5}_{-8}$$

5.4.3 Albédo de diffusion simple, pentes spectrales et paramètre d'asymétrie

L'albédo de diffusion simple et le paramètre d'asymétrie dérivés à partir des observations VIRTIS-M visible et infrarouge et des valeurs de la rugosité macroscopique $\bar{\theta}_{VIS}$ et $\bar{\theta}_{IR}$ sont donnés dans les figures 5.11aet 5.11b. Les parties non représentées correspondent à une région plus affectée par un signal parasite venant de la voie infrarouge (avant 0.45 µm), à des résidus de calibration (entre 0.8 et 1.0 µm), ou à la jonction entre les filtres présents sur le capteur (deux canaux autour de 0.65 µm, entre 1.4 et 1.6 µm ainsi qu'entre 2.4 et 2.6 µm).

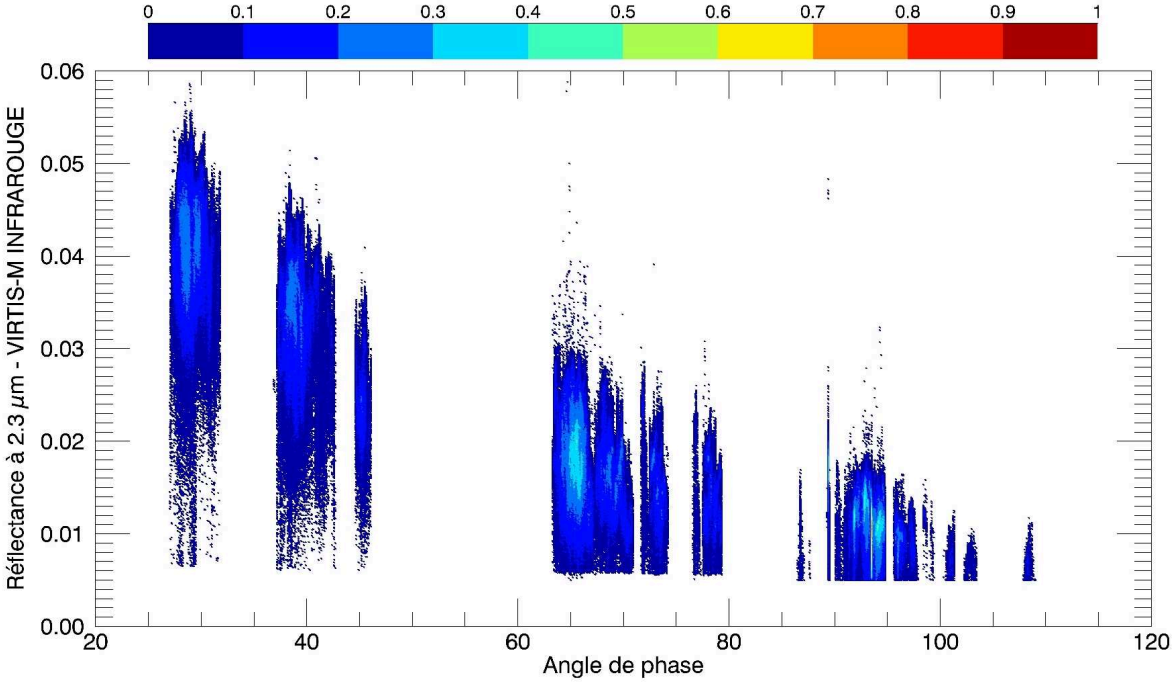
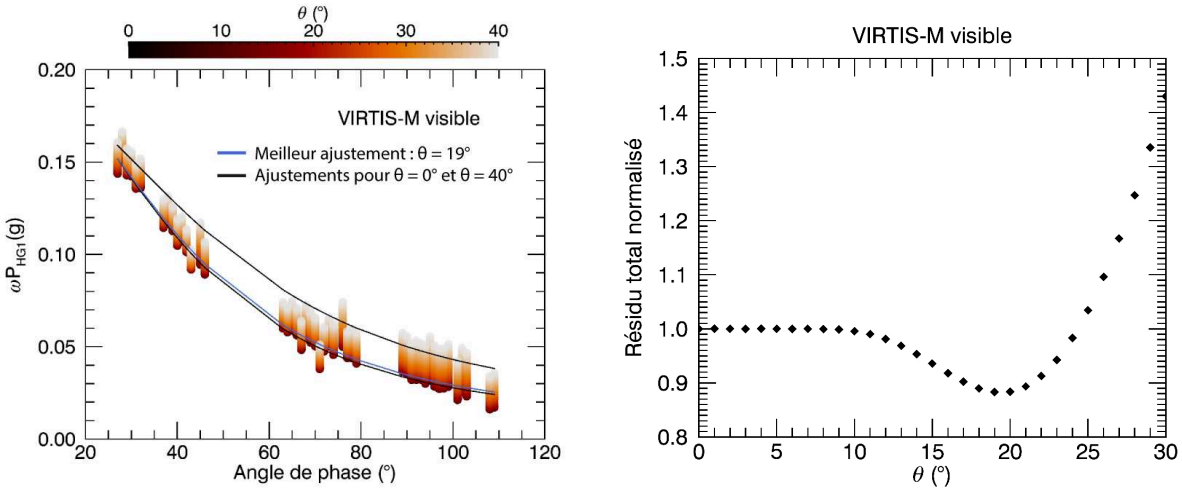


FIGURE 5.8 – Densité (échelle normalisée) de la réflectance moyennée sur 10 canaux autour de 2.3 µm µm des observations VIRTIS-M infrarouge retenues pour l'étude photométrique couvrant MTP006 à MTP012.

L'albédo de diffusion simple reproduit les caractéristiques spectrales de la surface corrigées de l'influence de la géométrie des observations, d'où l'avantage de l'étudier. Son niveau est très bas dans le visible et augmente avec la longueur d'onde. Il passe ainsi de 0.051 à 0.55 µm à 0.14 à 2.8 µm. Ces valeurs sont identiques à celles calculées avec le même modèle par Ciarniello et al. (2015) : 0.052 à 0.55 µm et 0.14 à 2.8 µm. Ciarniello et al. (2015) compare ces valeurs avec celles dérivées dans le visible à partir des données de la caméra OSIRIS par Fornasier et al. (2015). À 0.65 µm on trouve ainsi pour VIRTIS un albédo de diffusion simple de 0.059 et de 0.042 pour OSIRIS. La valeur calculée pour VIRTIS à cette longueur d'onde est une moyenne des albédos de diffusion simple des canaux adjacents en raison du problème de filtre sur celui à 0.65 µm. L'écart entre les valeurs de VIRTIS et OSIRIS s'explique par l'utilisation d'un modèle différent. Les valeurs de réflectance d'OSIRIS couvrent les petits angles de phase et nécessitent en effet l'utilisation des termes prenant en compte l'effet d'opposition dans le modèle de Hapke. D'un autre côté, les phases couvertes ne vont pas au-dessus de 54° (Fornasier et al., 2015) et le modèle utilisé sera donc moins sensible et moins précis sur la détermination de $\bar{\theta}$ qui agit plus aux grandes phases.

Bien que possédant un albédo très faible, 67P n'est pas l'objet le plus sombre que l'on connaisse puisque les comètes Wild 2, Tempel 1 Hartley 2 sont plus sombres d'après le comparatif de Ciarniello et al. (2015). Cette caractéristique partagées par les noyaux cométaires connus peut aussi se trouver chez les astéroïdes primitifs (Masiero et al., 2011; Fornasier et al., 2014), notamment pour Phobos par exemple (Murchie and Érard, 1996).

On retrouve dans le spectre de l'albédo de diffusion simple la bande d'absorption provoquée par des composés organiques, non identifiés de façon certaine jusqu'à aujourd'hui (Capaccioni et al., 2015; Qui-



(a) Représentation des valeurs de l'équation 5.11 pour les différentes valeurs de $\bar{\theta}$ testées pour VIRTIS-M visible à 0.55 µm. Les courbes noires représentent l'ajustement du modèle pour $\bar{\theta} = 0°$ (bas) et $\bar{\theta} = 40°$(haut). La courbe bleue représente le meilleur ajustement fournissant la valeur de $\bar{\theta}$.

(b) Résidus normalisés en fonction de $\bar{\theta}$ pour VIRTIS-M visible. Ils sont minimums pour $\bar{\theta} = 19°$.

FIGURE 5.9 – Représentation des valeurs de l'équation 5.11 pour différents $\bar{\theta}$ testés.

rico et al., 2016). On note une remontée de la réflectance à 3.2 µm, centre de la large bande. Est-ce le milieu de deux bandes d'absorptions se chevauchant, un composé exprimé en émission ou le bruit instrumental ? Là encore la question n'est pas encore tranchée mais on retrouve grâce à ces résultats ce motif, y compris dans VIRTIS-H comme on le verra dans le sous-section 5.4.5.

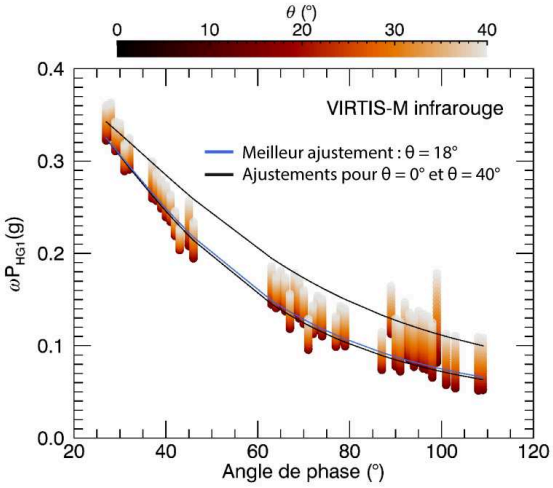
Le spectre de 67P présente un caractère rouge, traduisant l'augmentation de son albédo avec la longueur d'onde. Ce caractère est exprimé avec la pente spectrale que l'on calculera ici indépendamment dans le visible entre 0.8 µm et 0.55 µm (S_{VIS}) où elle est prononcée, et dans l'infrarouge (S_{IR}) entre 2.35 µm et 1.0 µm où elle est plus faible. Les mêmes indicateurs que Filacchione et al. (2010, 2016a); Ciarniello et al. (2016) sont utilisés ici. On a :

$$S_{VIS} = \frac{SSA_{0.8\mu m} - SSA_{0.55\mu m}}{0.8 - 0.55} \cdot \frac{1}{SSA_{0.55\mu m}} = 1.94\,\mu m^{-1} \tag{5.12}$$

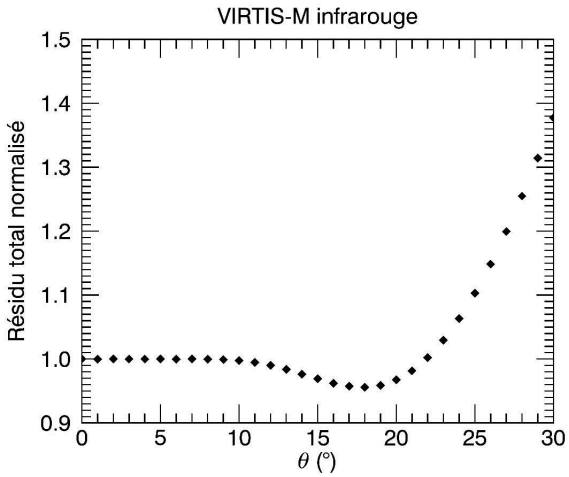
$$S_{IR} = \frac{SSA_{2.35\mu m} - SSA_{1.0\mu m}}{2.35 - 1.0} \frac{1}{SSA_{1.0\mu m}} = 0.29\,\mu m^{-1} \tag{5.13}$$

Où SSA_x correspond à la valeur de l'albédo de diffusion simple à la longueur d'onde x. Normaliser à 0.55 µm et 1.0 µm (afin de supprimer les éventuels effets d'illumination restant) n'est pas utile à ce stade mais le sera par la suite lorsque l'on souhaitera créer des cartes. On l'utilise cependant ici afin d'avoir des grandeurs comparables avec ce qui sera indiqué dans la suite.

Le paramètre d'asymétrie b présente de faibles variations sur la gamme spectrale étudiée. Il vaut -0.42 à 0.55 µm et -0.36 à 2.8 µm. Dans les deux cas, sa valeur étant inférieure à 0, cela correspondant à de la rétrodiffusion et à un lobe de diffusion intermédiaire, c'est à dire ni très directionnel (valeur proche de 1 ou -1) ni très isotrope (valeur proche de 0). Un tel comportement rétrodiffusant est attendu pour



(a) Représentation des valeurs de l'équation 5.11 pour les différentes valeurs de $\bar{\theta}$ testées pour VIRTIS-M infrarouge à 2.3 µm. Les courbes noires représentent l'ajustement du modèle pour $\bar{\theta} = 0°$ (bas) et $\bar{\theta} = 40°$(haut). La courbe bleue représente le meilleur ajustement fournissant la valeur de $\bar{\theta}$.



(b) Résidus normalisés en fonction de $\bar{\theta}$ pour VIRTIS-M infrarouge. Ils sont minimums pour $\bar{\theta} = 18°$.

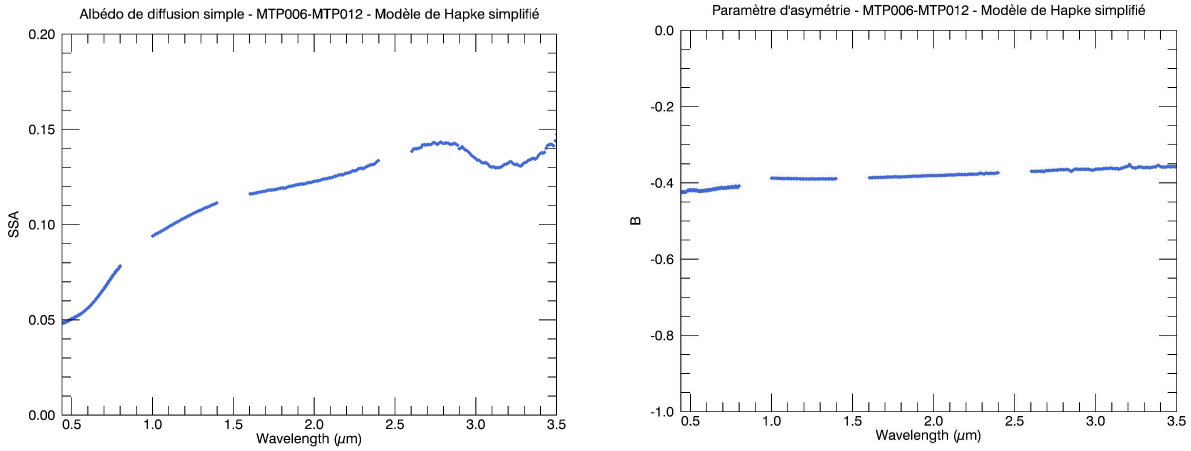
FIGURE 5.10 – Résidus normalisés en fonction de $\bar{\theta}$ pour VIRTIS-M visible et infrarouge.

des particules sombres comme celles présentes à la surface de 67P. Les photons y pénètrent peu ou si c'est le cas sont rapidement absorbés : ils n'interagiront pas avec d'autres grains (diffusion multiple faible) ou ne seront pas diffusés vers l'avant. Ces valeurs de b sont également à mettre en regard avec des mesures d'échantillons de graphite et des météorites de Gao et Allende, en partie représentatives des propriétés de la surface des astéroïdes, menées par Kamei and Nakamura (2002). Deux interprétations possibles sont ainsi données pour expliquer la rétrodiffusion de ces échantillons : d'une part le manque de couverture en angle de phase dans les observations d'astéroïdes et d'autre part une plus grande proportion de grosses particules (quelques centaines de micromètres) à la surface des astéroïdes (qui ont tendance à rétrodiffuser en comparaison au petites particules). La couverture en phase de nos données tend plutôt à favoriser la détermination d'un paramètre b synonyme de rétrodiffusion. Par conséquent, il n'est pas possible de déduire des informations certaines concernant la taille des particules à la surface de 67P à partir de cette valeur de b.

5.4.4 Variations spatiales de l'albédo de diffusion simple et de la pente spectrale

Une fois déterminées les valeurs de $\bar{\theta}$ et du paramètre d'asymétrie, il est possible d'inverser les équations 5.1 ou 5.10. Sous l'hypothèse que b et $\bar{\theta}$ sont constants sur toute la surface on peut alors retrouver pour chaque pixel une valeur de l'albédo de diffusion simple correspondante et en réaliser une carte pour étudier les variations spatiales de la surface. Ces cartes sont présentées pour les longueurs d'onde 0.55 µm et 2.35 µm dans les figures 5.13 et 5.14. Il est aussi possible d'étudier la variation spatiale de la pente spectrale dans le visible et l'infrarouge en se basant sur les formules 5.12 et 5.13 précédemment introduites.

Ces cartes se basent sur la même méthode de projection que les cartes de densité présentées dans le cha-



(a) Albédo de diffusion simple ω.

(b) Paramètre d'asymétrie b.

FIGURE 5.11 – Albédo de diffusion simple et paramètre d'asymétrie globale de 67P/CG entre août 2014 et février 2015 dérivés à partir de l'équation 5.10.

pitre 4 page 49 et dans l'annexe 9.5.3 page 288. La valeur projetée est la moyenne des valeurs présentes dans chaque élément de 0.5° de côté (qui peut donc être recouvertes par plusieurs pixels puisque l'on utilise toute la couverture spatiale du pixel). Les zones faiblement couvertes par les observations (voir les cartes de densité figures 5.7 et 5.8) comme la région de Hapi dans le cou (voir figures 5.12 et 3.6 page 38 pour le nom et la répartition des régions) peuvent ainsi présenter des artéfacts provoqués par ce manque de données mais aussi le fait de projeter sur un planisphère un corps qui n'a rien d'une sphère). C'est le cas des zones entre les latitudes 60° et 90° entre les longitudes 0°E–45°E et 45°W–0°E mais aussi au-dessus de 70-80°N pour toutes les autres longitudes. Les artéfacts liés aux reliefs peuvent aussi être gênants dans l'interprétation de la carte comme on l'a souligné précédemment. Pour toutes ces raisons une analyse détaillée doit être faite avec précaution.

On notera dans un premier temps que les deux cartes d'albédo de diffusion simple dans le visible et l'infrarouge sont corrélées. Les zones les plus claires à la surface sont les régions Nors-Ouest d'Imhotep (flèche bleu figure 5.13), Nord de Ash (flèche verte) et Ouest de Khepry (flèche rouge). Ces régions sont associées à des terrains plutôt lisses. Pour autant, il n'est pas possible de généraliser cette association car la région du cou (Hapi), recouverte de poussière, n'apparait pas claire ici mais intermédiaire à sombre. Concernant le reste de la carte, on observe de nombreuses corrélations entre des reliefs escarpés et des albédos sombres, c'est notamment le cas au Sud-Est de la région de Babi (flèches orange). On voit ici qu'un terrain très escarpé impose des artéfacts malgré la correction photométrique, c'est donc le cas d'une grande partie de la comète, rendant ce type d'analyse d'autant plus délicate. Dans l'ensemble, la surface ne présente pas d'inhomogénéités très importantes malgré les quelques différences dans les valeurs d'albédo de diffusion simple soulignées. L'étude menée par Ciarniello et al. (2015) sur différentes « macro » régions (indépendamment de celles définies par El-Maarry, M. R. et al. (2015); El-Maarry et al. (2017)) montre ainsi que ces différences sont du même ordre de grandeurs.

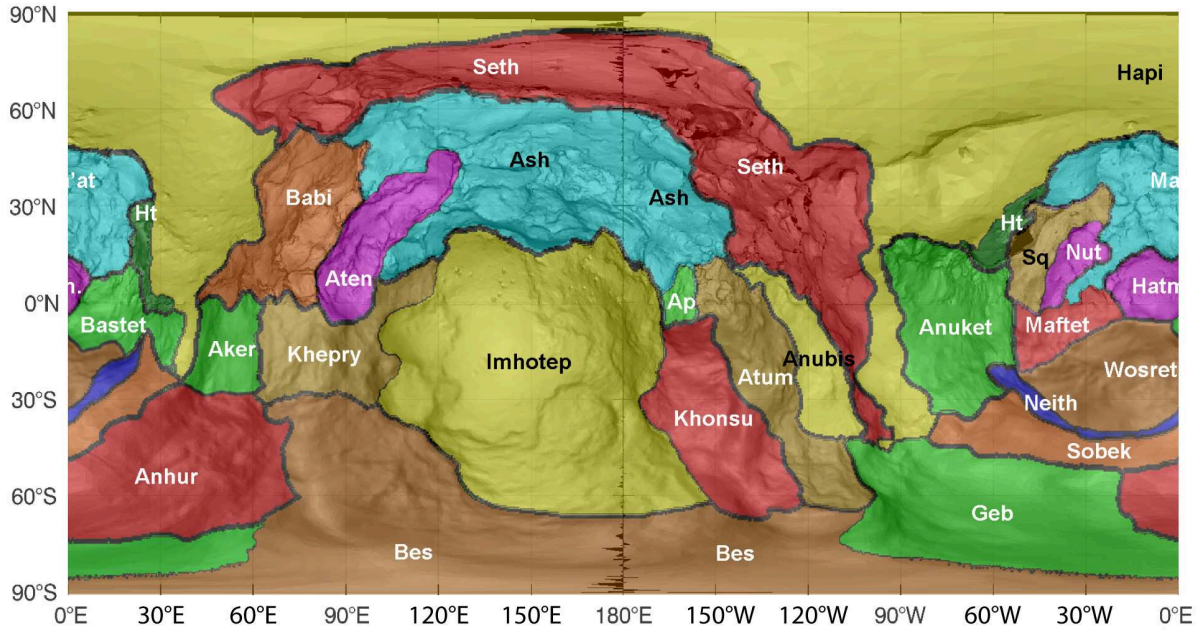


FIGURE 5.12 – Carte des régions de 67P telles que définies par El-Maarry et al. (2016). La figure, issue de El-Maarry et al. (2016) a été adaptée afin de respecter la même nomenclature de coordonnées.

Les cartes de pentes spectrales, aussi bien dans le visible que dans l'infrarouge, ne présentent pas de corrélations ou d'anticorrélations nettes avec l'albédo de diffusion simple. Fornasier et al. (2015) et Ciarniello et al. (2016) observent dans la région de Hapi (le « cou ») une pente moins rouge que sur le reste de la surface et l'interprètent comme un enrichissement en glace d'eau provoqué par l'activité de sublimation et par la recondensation à la surface (Fornasier et al., 2015; Filacchione et al., 2016a; Fornasier et al., 2016; Ciarniello et al., 2016). Ici, cette tendance n'apparait pas sur les cartes réalisées. Sur les zones fléchées dans la carte de l'albédo de diffusion simple à 0.55 µm (figure 5.13), on observe les deux comportements, à savoir que les régions brillantes d'Imhotep et de Ash présentent plutôt une pente moins rouge dans le visible (sauf pour l'Est de Ash, flèche verte de gauche) tandis que la région Khepry apparaît elle plus rouge. Les deux tendances sont donc représentées ici et un terrain brillant ne semble pas toujours associé à une pente spectrale bleue. C'est également le cas pour des régions dont l'albédo est peu variable mais pour lesquelles la pente spectrale varie un peu plus. On note ainsi un contraste en pente spectrale entre les régions Nord de Anuket (ellipse pointillée orange) et Sud-Est de Ma'at, Hatmehit, Serquet et Nut (ellipse pointillée noir) alors que ces régions possèdent un albédo de diffusion similaire (voir cartes 5.13 et 5.15).

Dans les cartes d'albédo de diffusion simple à 2.35 µm et de pente spectrale dans l'infrarouge, on observe que les régions Nord de Anuket, Sud-Est de Ma'at, Hatmehit, Serquet et Nut ont les mêmes pentes spectrales (ellipse rouge et noir carte ~~5.16~~), ce qui n'était pas le cas dans le visible où l'on notait une différence. La région d'Imhotep exhibe également un comportement inverse entre pente spectrale dans le visible et dans l'infrarouge. Alors que dans le visible sa pente spectrale est faiblement rouge, dans l'infrarouge, cette région possède une pente spectrale plutôt rouge (flèche bleue carte 5.16). De manière générale, on remarque que les pentes spectrales dans le visible et l'infrarouge sont anticorrélées. Lorsque la pente spectrale est faible dans le visible elle est élevée dans l'infrarouge. On le voit pour la région

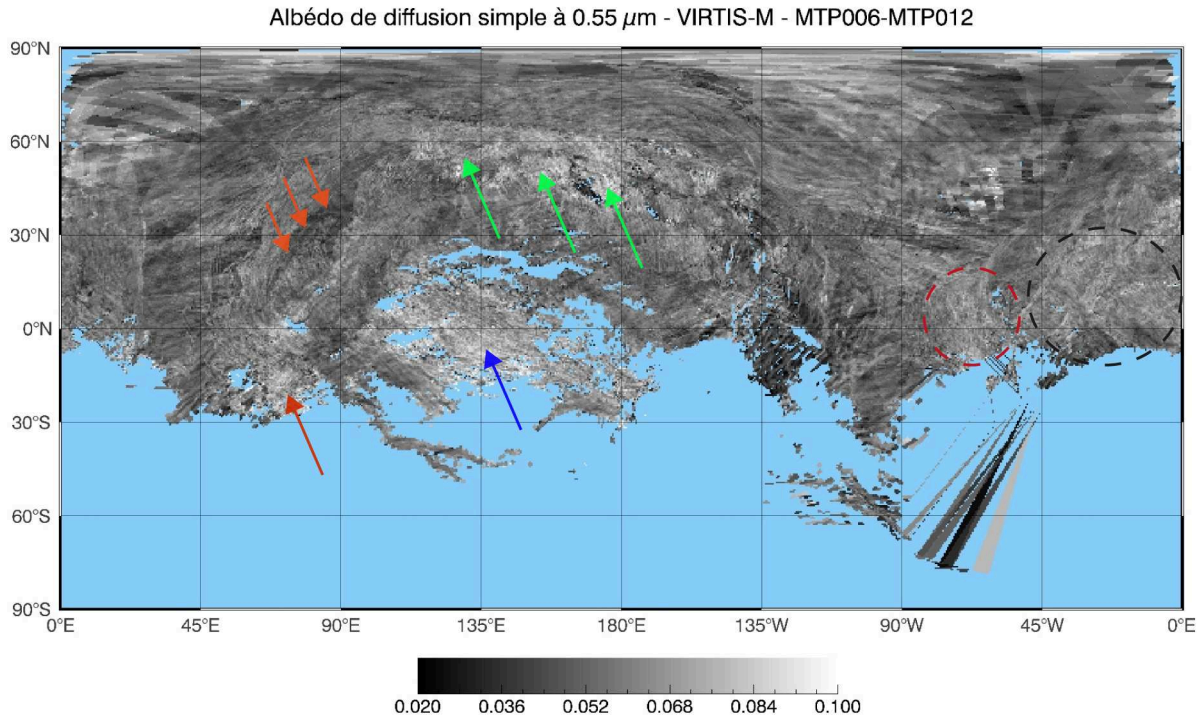


FIGURE 5.13 – Carte de l'albédo de diffusion simple à 0.55 µm calculés à partir des observations VIRTIS-M entre MTP006 et MTP012. Les flèches et cercles sont des repères afin de localiser plus facilement les régions discutées dans le texte.

d'Imhotep (flèche bleue) mais également au Nord de Ash (flèches vertes) et au Sud de Ash–Nord de Aten (flèche pointillés magenta). Enfin c'est aussi le cas pour la région de Khepry indiquée par la flèche orange et le Nord de Anuket (cercle rouge).

On a évoqué plus tôt que l'interprétation des terrains possédant une pente faiblement rouge et un albédo élevé est la présence d'une teneur en glace d'eau plus importante (Fornasier et al., 2015; Filacchione et al., 2016a; Fornasier et al., 2016; Ciarniello et al., 2016). Les cartes présentées ici, qui intègrent des données sur une longue période de temps, ne mettent pas en évidence de corrélations majeures entre l'albédo et la pente spectrale, que ce soit dans le visible et dans l'infrarouge. De plus, l'anticorrélation mis en évidence entre les deux cartes des pentes spectrales – signifiant que lorsque qu'elles sont faiblement rouges en visible on observe des pentes plus rouges en infrarouge et inversement – ne va pas dans le sens de cet argument.

5.4.5 Comparaison entre VIRTIS-M et VIRTIS-H

L'étude globale réalisée pour VIRTIS-M peut être faite pour VIRTIS-H également. Ici se pose en revanche le problème de la couverture spatiale puisque même si les phases balayées sont équivalentes (voir figures 5.17 et 5.18), les observations H sont non seulement moins nombreuses mais couvrent également

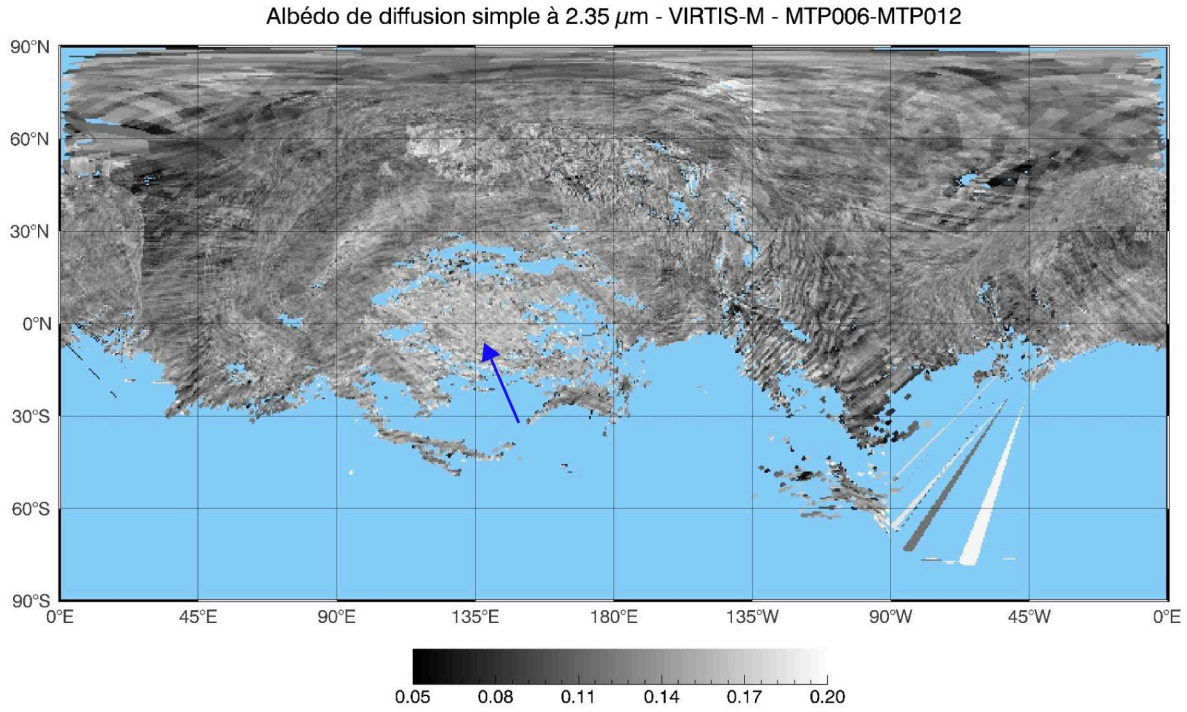


FIGURE 5.14 – Carte de l'albédo de diffusion simple à 2.35 µm calculés à partir des observations VIRTIS-M entre MTP006 et MTP012. Les flèches et cercles sont des repères afin de localiser plus facilement les régions discutées dans le texte.

une aire bien plus petite ; l'hémisphère Nord de 67P n'étant pas totalement observé. Cela signifie qu'il n'est pas exclu, *a priori,* qu'il y ait des différences ayant comme origine la nature du terrain. De plus, il peut exister des incertitudes dues au fait que les observations VIRTIS-H ne sont pas calibrées de la même façon que celle de VIRTIS-M et que les artéfacts instrumentaux sont moins bien corrigés.

On observe une plus grande dispersion dans les valeurs de réflectances de la figure 5.18 et par voie de conséquence dans les valeurs de l'équation 5.11 représentées dans la figure 5.19. C'est en raison de ces incertitudes plus importantes, parce que la définition de l'erreur adoptée jusqu'alors contraint dans ce cas trop fortement la détermination des paramètres et enfin parce que la couverture en phase est un peu moins importante que pour VIRTIS-M (figures 5.17 et 5.18) qu'il n'est pas possible de déterminer une valeur de $\bar{\theta}$ (voir la courbe noire figure 5.20). On peut cependant obtenir une valeur $\bar{\theta}$ en modifiant la définition de l'erreur (voir sous-section 5.4.1) : en prenant simplement l'écart type de la distribution dans chaque tranche de 1° d'angle de phase et sans le diviser par le nombre d'éléments de cette distribution, on permet un ajustement moins contraint et on obtient finalement un minimum dans l'évaluation du χ^2. Ce minimum nous donne une valeur de $\bar{\theta} = 20^{+6.5}_{-11}$.

Les deux jeux de données de VIRTIS-M et VIRTIS-H malgré leurs différences, nous permettent de retrouver des valeurs similaires de la rugosité macroscopique. Pour autant, son interprétation physique reste sujette à discussion en comparaison à la définition qu'en a donné Hapke (Hapke, 1984; Shepard and Campbell, 1998; Helfenstein and Shepard, 1999; Cord et al., 2003, 2004) et il est important de noter qu'une meilleure précision dans sa dérivation est possible uniquement avec une gamme d'angles de phase

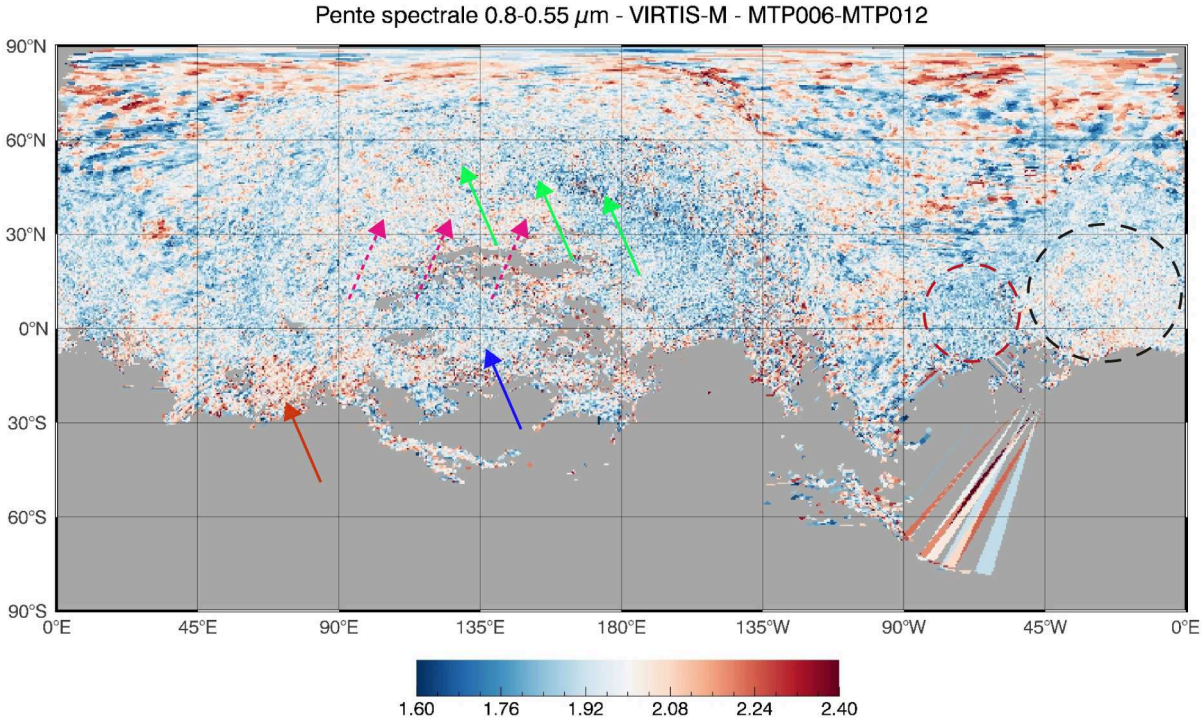


FIGURE 5.15 – Carte de la pente spectrale calculée entre 0.8 µm et 0.55 µm. La couleur bleue sur l'échelle correspond à une pente « moins rouge » que les couleurs blanches et rouges, et non réellement bleu. Les flèches et cercles sont des repères afin de localiser plus facilement les régions discutées dans le texte.

plus étendue. Cela signifie que cette valeur pourrait être différente si les phases obtenues allaient jusqu'à 130° ou plus par exemple. Pour cette raison, mais aussi parce que la définition de l'erreur sur la fonction de phase est différente lorsque l'on détermine ce paramètre pour VIRTIS-M et VIRTIS-H, le modèle de Hapke dans sa version simplifié permettant de déterminer $\bar{\theta}$ ne sera pas utilisé pour la comparaison des paramètres ω et b.

Les figures 5.21 et 5.22 donnent une comparaison entre les albédos de diffusion simple et les paramètres d'asymétrie calculés à partir des observations VIRTIS-M et VIRTIS-H. On rappelle que l'on utilise désormais le modèle de Lommel-Seeliger de façon à être cohérent dans la définition de l'erreur contraignant l'ajustement des paramètres (voir sous-section 5.4.1 et paragraphe précédent sur la détermination de $\bar{\theta}$ pour VIRTIS-H).

Alors que les paramètres d'asymétrie sont en très bon accord entre les deux voies sur la gamme spectrale qu'ils partagent, les albédos de diffusion simple présentent un écart de 20% à 30% (voir section 5.5). On retrouve cependant pour VIRTIS-H la même forme spectrale puisque qu'entre 2.0 µm et 2.8 µm l'albédo augmente. On retrouve également la bande d'absorption centrée à 3.2 µm et on notera avec intérêt la même remontée de l'albédo à 3.2 µm. Cependant, cette remontée correspondant sur VIRTIS-H à la limite entre deux ordres spectraux, il est difficile de faire le lien entre VIRTIS-H et VIRTIS-M concernant cette caractéristique.

L'écart de niveau observé entre les deux instruments est très probablement provoqué par la différence de calibration entre les deux instruments (voir section 4.2.3 page 59 pour la discussion sur cet écart).

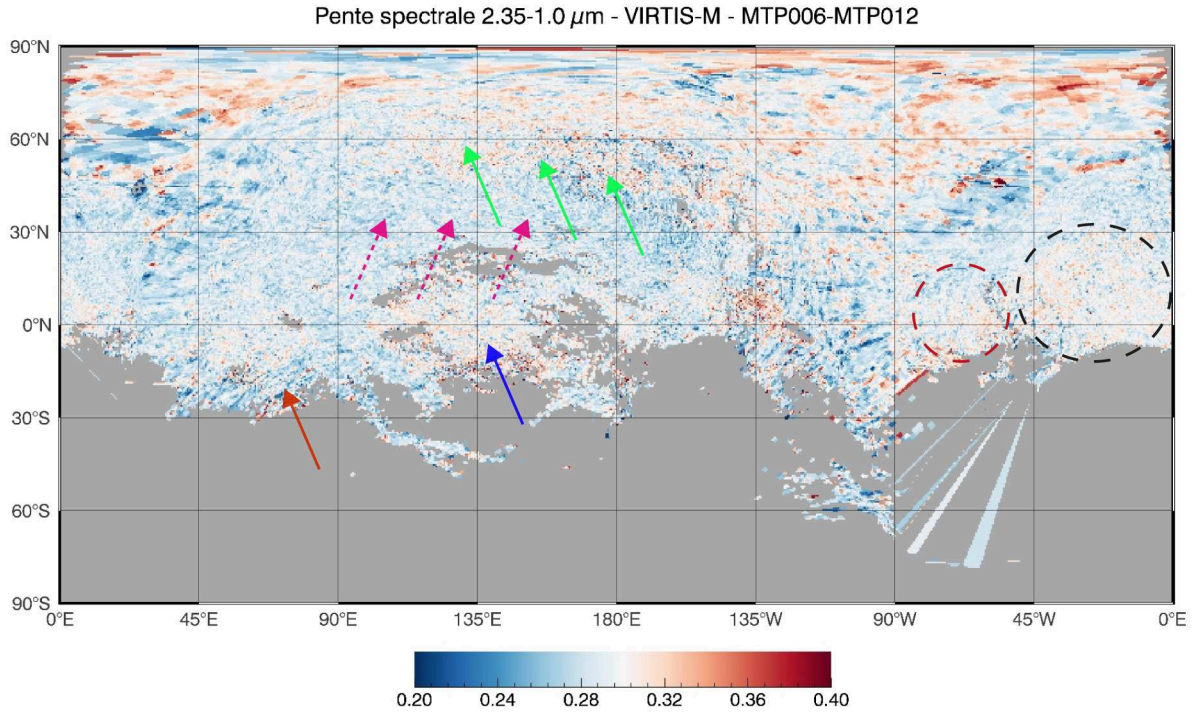


FIGURE 5.16 – Carte de la pente spectrale calculée entre 2.35 µm et 1.0 µm à partir des données de VIRTIS-M entre MTP006 et MTP012. La couleur bleue sur l'échelle correspond à une pente « moins rouge » que les couleurs blanches et rouges, et non réellement bleu. Les flèches et cercles sont des repères afin de localiser plus facilement les régions discutées dans le texte.

Les motifs dans le spectre sont la combinaison des différents artéfacts de calibration non encore corrigés inhérent à VIRTIS-H (voir également la section 4.2.3 page 59). Ils se découpent parfois selon les ordres spectraux puisque chacun d'entre eux peut être affectés par ces artéfacts de façon individuel. Enfin, b ou ω présentent une plus grande dispersion pour VIRTIS-H que pour VIRTIS-M, le premier donnant un signal plus bruité malgré les efforts entrepris sur la sélection des canaux spectraux.

L'étude de l'albédo de diffusion simple est un des seuls moyens permettant d'évaluer de façon précise les écarts de calibration entre VIRTIS-H et VIRTIS-M. En l'occurrence, on montre ici qu'il existe un écart de 20% à 30% en niveau entre les deux voies. Caractériser cet écart permettra d'améliorer la calibration de VIRTIS-H et la correction des artéfacts pouvant jouer sur le spectre de ce paramètre. Dans la même optique, l'étude thermique du chapitre 6 permet également ce genre d'évaluation. D'autant qu'avoir une calibration absolue est important pour la dérivation des températures.

5.4.6 Comparaison entre le modèle de Lommel-Seeliger et le modèle de Hapke simplifié

Il est intéressant de comparer les différents modèles photométriques entre eux de façon à mettre en évidence celui qui pourrait être le plus adapté ou celui qui, au contraire, ne permettrait pas d'obtenir des résultats satisfaisants. Plusieurs possibilités se présentent ici. Il est possible de comparer le modèle de Lommel-Seeliger (équation 5.1) à celui de Hapke dans sa version simplifiée (équation 5.10) et dans les deux cas avec une fonction de phase à un lobe , c'est ce qui est abordé dans la sous-section 5.4.6.1. On

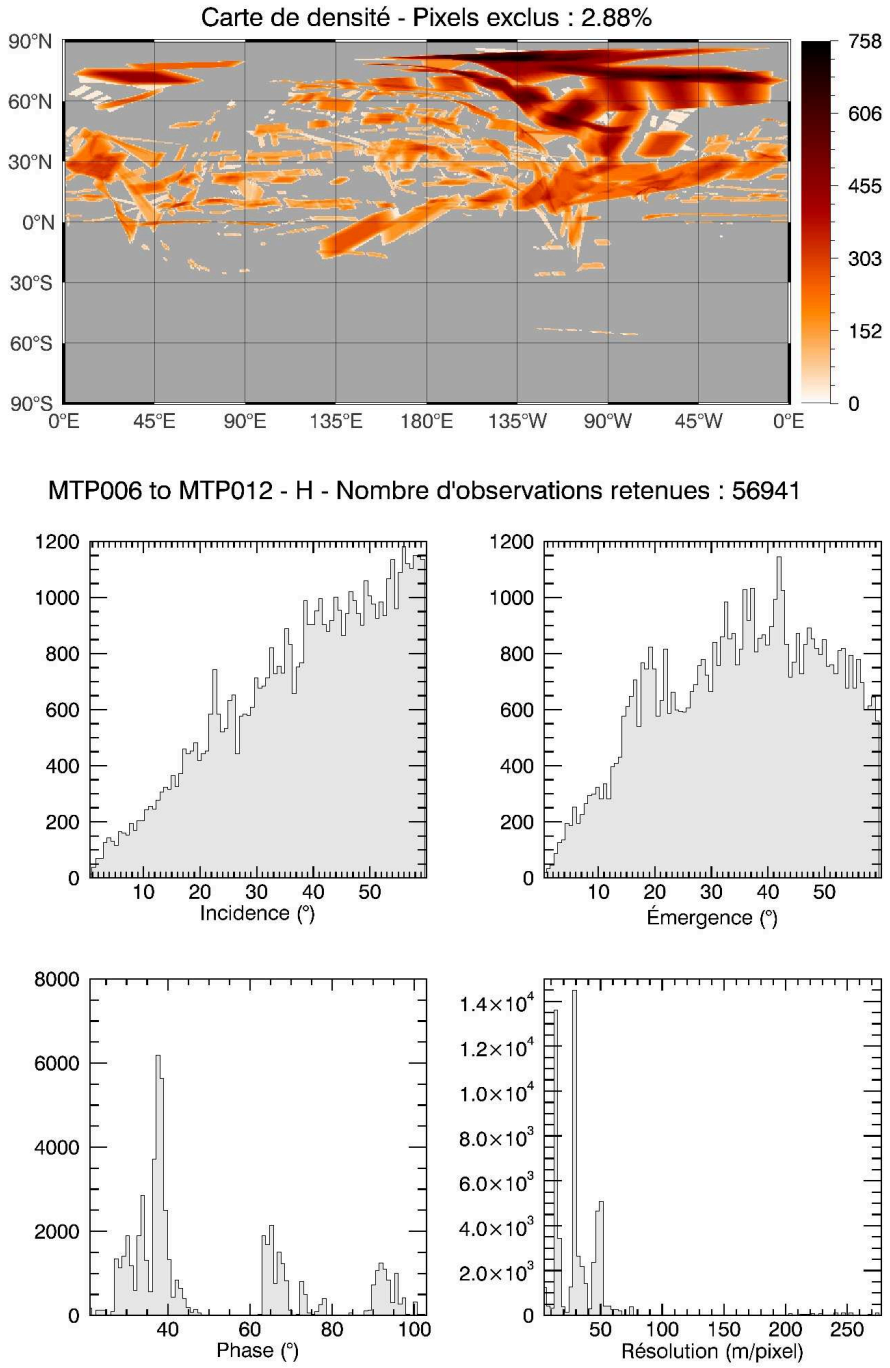


FIGURE 5.17 – Observations VIRTIS-H retenues pour l'étude des paramètres photométriques. Pour les détails concernant la réalisation des cartes de densité, voir 9.5.3.

peut également comparer les paramètres dérivés à partir des fonctions de phase de Henyey-Greenstein à 1 lobe (équation 5.8) et à 2 lobes (équation 5.9), c'est ce qui est fait dans la sous-section 5.4.6.2. Dans la section 5.5 on compare les écarts entre les différentes méthodes lorsque cela fait sens.

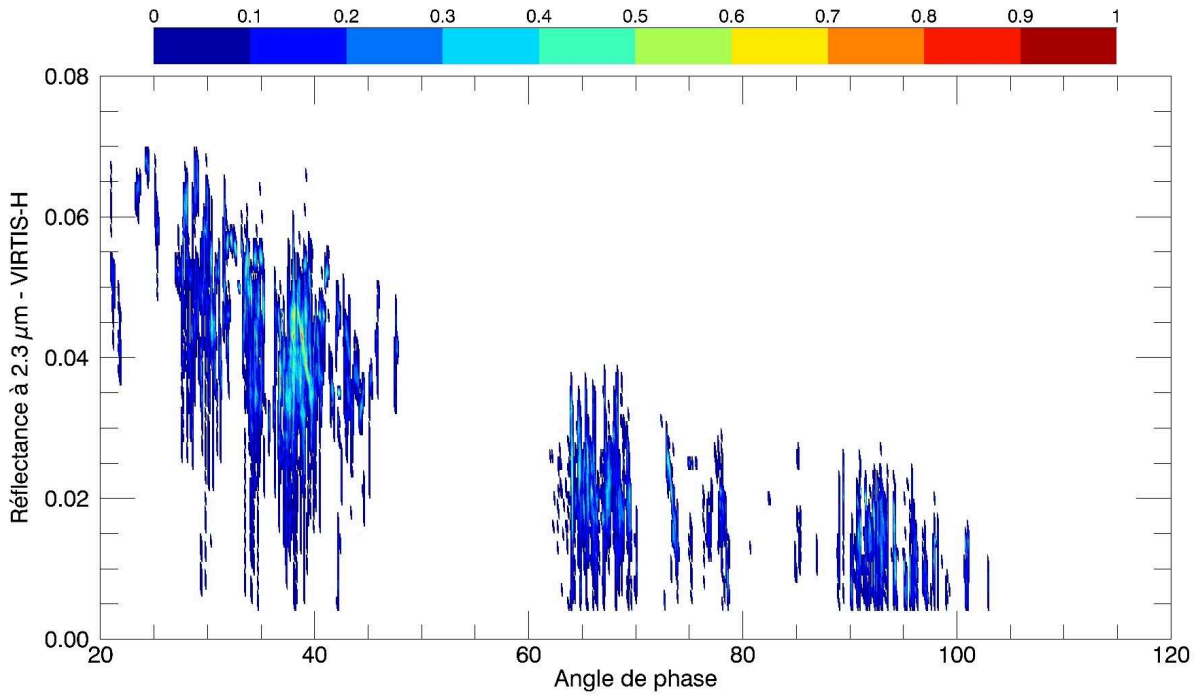


FIGURE 5.18 – Densité (échelle normalisée) de la réflectance moyennée sur 10 canaux autour de 2.3 µm des observations VIRTIS-H retenues pour l'étude photométrique couvrant MTP006 à MTP012.

5.4.6.1 Fonction de phase Henyey-Greenstein à un lobe

La détermination de l'albédo de diffusion simple et du paramètre d'asymétrie a été réalisée avec le modèle de Lommel-Seeliger et le modèle de Hapke simplifié (tel que décrit par l'équation 5.10). Les figures 5.21 et 5.22 présentent les valeurs obtenues pour ces paramètres. Pour chaque jeu de données, les différences entre les albédos de diffusion simple (figure 5.23) sont minimes pour chacun des modèles. Le modèle de Hapke donne un résultat sensiblement plus élevé de manière générale. Cette différence est plus marqué lorsque l'on compare les deux modèles pour VIRTIS-M infrarouge, ce qui est sans doute dû au paramètre $\bar{\theta}$ dont la valeur n'est pas la même pour les deux voies visible et infrarouge. Pour VIRTIS-H, l'écart entre les deux modèles est très faible mais c'est aussi le modèle de Hapke qui conduit à un albédo de diffusion simple plus grand.

La paramètre b connait aussi une faible différence selon le modèle utilisé. En l'occurrence le modèle de Hapke donne un paramètre d'asymétrie plus faible d'environ 0.01 sur l'ensemble de la gamme de longueur d'onde. Pour le b issu des données VIRTIS-H c'est en revanche l'inverse puisque le modèle de Hapke donne des valeurs sensiblement plus élevées, cependant l'écart est trop faible pour être signifiant (≈ 0.005).

Les différences observées, que ce soit dans l'albédo de diffusion simple ou le paramètre d'asymétrie, proviennent du fait que le modèle de Hapke intègre une fonction d'ombrage, ce que ne fait pas le modèle de Lommel-Seeliger. La fonction d'ombrage permet de tenir compte du relief de la surface et notamment des ombres qui y sont projetées. En ne prenant pas en compte cet effet, qui aura tendance – en apparence – à assombrir la surface aux grandes valeurs de phases, le modèle de Lommel-Seeliger retourne un albédo

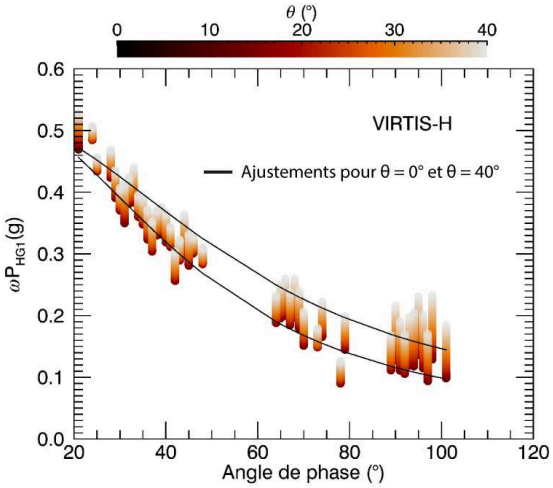


FIGURE 5.19 – Représentation des valeurs de l'équation 5.11 pour les différentses valeurs de $\bar{\theta}$ testées pour VIRTIS-H à 2.3 µm. Les courbes en noir représentes l'ajustement du modèle pour $\bar{\theta} = 0°$ et $\bar{\theta} = 40°$. Aucun ajustement ne permet de déduire $\bar{\theta}$ convenablement.

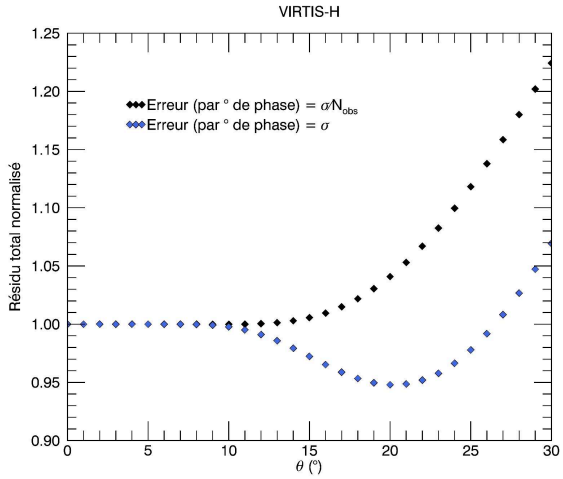


FIGURE 5.20 – Résidus normalisés en fonction de $\bar{\theta}$ pour VIRTIS-H. On trouve une valeur de $\bar{\theta}$ seulement si la définition de l'erreur est modifiée.

de diffusion simple plus faible.

Alors que l'albédo de diffusion simple est principalement influencé par le niveau absolu de la courbe de phase, la fonction de phase intégrant le paramètre b joue sur sa forme (voir figure 5.4a). Si le modèle choisi n'utilise pas la fonction d'ombrage d'Hapke alors les variations à grandes phases de cette courbe de phase se verront répercutées sur la valeur du paramètre d'asymétrie. C'est ce qui est observé dans la figure 5.24 où, pour VIRTIS-M, b est plus grand pour le modèle de Lommel-Seeliger.

Dans les deux cas, les écarts entre les paramètres dérivés sont faibles et aucun comportement anormal (dispersion plus grande ou divergence lors de l'ajustement) n'est observé. L'évaluation des χ^2 réduit (le χ^2 de l'ajustement à une longueur d'onde donnée divisé par le nombre de degrés de liberté), visible dans le tableau 5.1, indique que l'ajout d'un paramètre grâce au modèle de Hapke n'améliore pas suffisamment chaque ajustement pour pouvoir préférer ce modèle (ce n'est par ailleurs pas le cas pour VIRTIS-H).

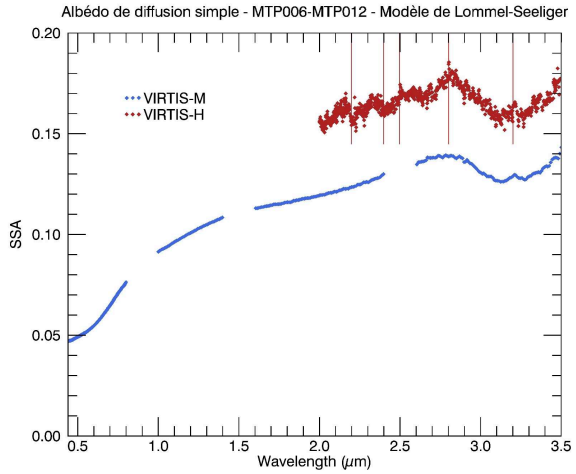


FIGURE 5.21 – Albédos de diffusion simple (SSA) calculés avec le modèle de Lommel-Seeliger calculés à partir des observations VIRTIS-M et H entre MTP006 et MTP012. Les barres rouges verticales symbolisent la jonction entre les différent ordres spectraux de VIRTIS-H.

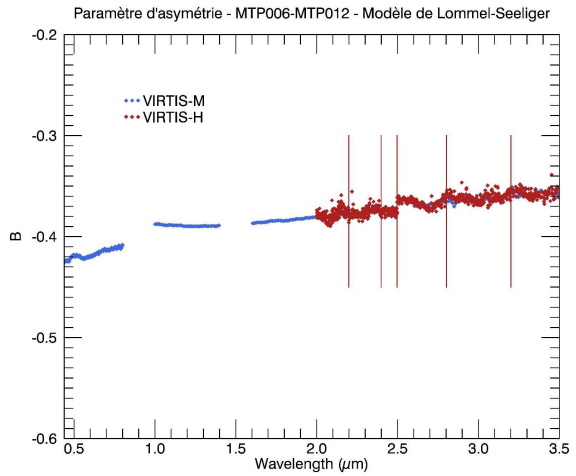


FIGURE 5.22 – Paramètres d'asymétrie (B) de la fonction de phase de Henyey-Greenstein à un lobe calculé avec le modèle de Lommel-Seeliger à partir des observations VIRTIS-M et H entre MTP006 et MTP012. Les barres rouges verticales symbolisent la jonction entre les différents ordres spectraux de VIRTIS-H.

Cela indique qu'aucun de ces deux modèles n'est préférables à l'autre et qu'ils décrivent tous les deux la surface convenablement. L'avantage du modèle de Hapke est de fournir une valeur de pente moyenne à travers le paramètre $\bar{\theta}$, mais ce paramètre restant discuté, la question d'utiliser ce modèle, même simplifié, demeure. À nouveau, avec une gamme d'angles de phase ne permettant pas une détermination précise de ce paramètre, il est prudent de ne pas l'inclure dans le modèle au risque d'influencer la valeur des autres paramètres comme b.

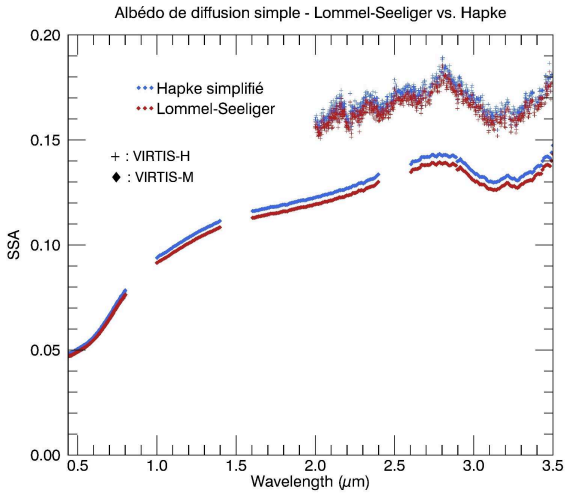


FIGURE 5.23 – Albédo de diffusion simple (SSA) global de 67P/CG entre août 2014 et février 2015 dérivés à partir de l'équation 5.10.

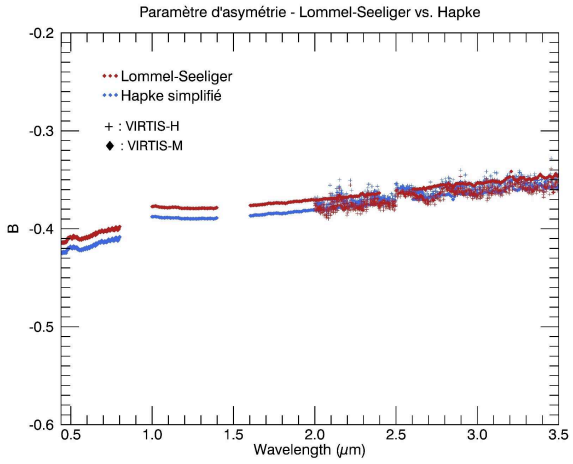


FIGURE 5.24 – Paramètre d'asymétrie (b) global de 67P/CG entre août 2014 et février 2015 dérivés à partir de l'équation 5.10.

5.4.6.2 Fonction de phase Henyey-Greenstein à deux lobes

La fonction de phase de Henyey-Greenstein à 1 lobe permet de décrire l'anisotropie de la diffusion de la lumière par les particules de la surface ainsi que sa direction. Elle décrit la forme de la courbe de phase. Il est aussi possible pour cela d'utiliser une fonction à deux lobes (voir équation 5.9) dont le premier paramètre (b) décrit la largeur des lobes et le deuxième (c) le caractère directionnel de la diffusion (vers l'avant, vers l'arrière).

Les albédos de diffusion simple dérivés grâce aux modèles de Hapke et Lommel-Seeliger prenant en compte la fonction de phase à deux lobes (voir figures 5.26 et 5.27) sont presque similaires à ceux déterminés avec la fonction de phase à un lobe (figure 5.23). Ils présentent un écart plus important entre eux avec la fonction à deux lobes cependant. On note que les valeurs obtenues pour VIRTIS-H présentent une plus grande dispersion en niveau entre chaque longueur d'onde, signe que l'ajustement est moins bon dans ce cas.

χ^2 réduit	Modèle de Lommel-Seeliger	Modèle de Hapke
VIRTIS-M à $0.55\mu m^*$	714	627
VIRTIS-M à $2.3\mu m^*$	1296	1190
VIRTIS-H à $2.3\mu m^*$	221	234

TABLE 5.1 – Évaluation des ajustements entre les modèles de Hapke (équation 5.10) et Lommel-Seeliger (équation 5.1) à l'aide du χ^2 réduit. Les valeurs sont comparables entre les deux modèles et non entre les différents jeu de données. * : une moyenne de dix canaux autour de la valeur indiqué a été calculée.

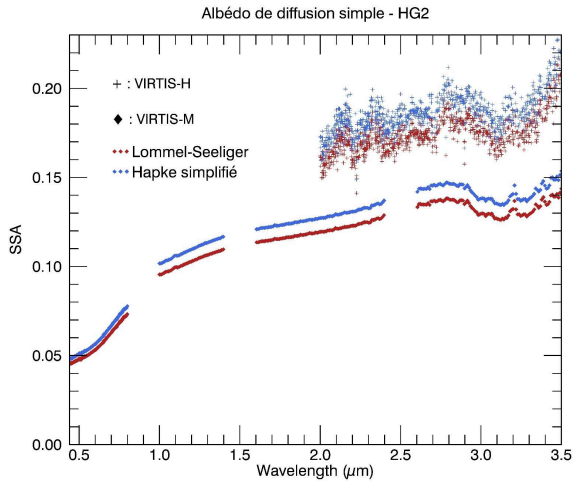


FIGURE 5.25 – Albédos de diffusion simple dérivés avec le modèle de Lommel-Seeliger et Hapke simplifié et avec une fonction de phase à deux lobes.

Le paramètre d'asymétrie varie de 0.41 à 0.36 pour VIRTIS-M et se distribue entre 0.40 et 0.38 pour VIRTIS-H. Cela indique un lobe de diffusion intermédiaire (0 indiquerait une diffusion homogène, dans toutes les directions ; 1 indiquerait un lobe étroit et allongé pour une diffusion plus directionnelle) comme dans le cas avec la fonction de phase à un lobe. Les paramètres dérivés des deux modèles ne présentent pas de différences majeures à nouveau. Comme pour l'albédo de diffusion simple, les valeurs pour VIRTIS-H souffrent également d'une dispersion en valeur d'une longueur à l'autre, synonyme d'un ajustement moins bon.

Le paramètre c, dit fraction de rétrodiffusion, indique dans quelle direction majoritaire la diffusion a lieu. Plus exactement, puisque l'on considère deux lobes de diffusion, il indique donc leurs proportions respectives. On obtient ici un c très différent entre les voies visible et infrarouge de VIRTIS-M. On étudiera préférentiellement VIRTIS-M infrarouge parce qu'il bénéficie d'une meilleur calibration et à partir de $1.1\mu m$ en raison de la divergence observée entre les deux voies. Dans cette gamme spectrale et pour VIRTIS-M infrarouge donc, le paramètre c varie de 0.90 à 0.95 avec le modèle de Hapke, et de 0.95 à 1.04 avec le modèle de Lommel-Seeliger. Pour VIRTIS-H, il est peu contraint et varie entre environ 0.8 et 1.0 avec le modèle de Hapke et entre 0.7 et 0.9 avec le modèle de Lommel-Seeliger. Dans tous ces cas, cela indique une très forte rétrodiffusion. Il est important de rappeler ici que la proportion de diffusion vers l'avant ne peut être déterminée que si l'on dispose d'angles de phase élevés. Ici, ils couvrent la

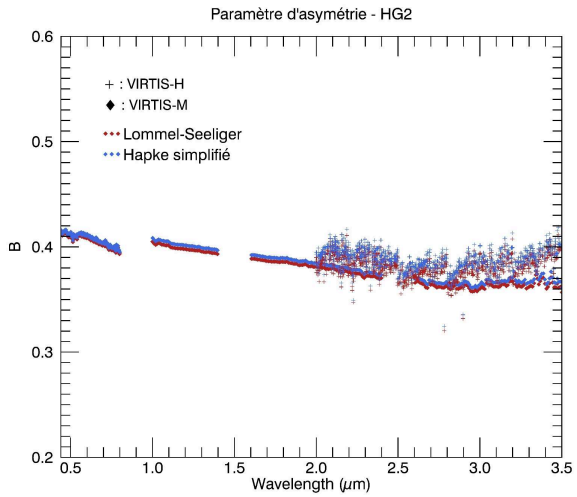


FIGURE 5.26 – Paramètres d'asymétrie dérivés avec le modèle de Lommel-Seeliger et Hapke simplifié et avec une fonction de phase à deux lobes.

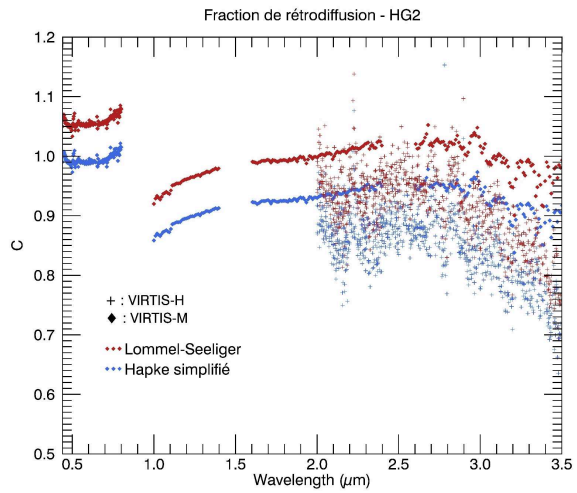


FIGURE 5.27 – Fractions de rétrodiffusion dérivés avec le modèle de Lommel-Seeliger et Hapke simplifié et avec une fonction de phase à deux lobes.

gamme allant de 20° à 110°, ce qui peut être suffisant selon la nature des particules, notamment si ces dernières sont fortement rétrodiffusantes. En revanche, il peut être plus délicat voire impossible de déterminer la proportion de diffusion vers l'avant sans données à des angles de phase supérieurs, la courbe de phase (ici on parle bien de l'équation 5.11) pouvant présenter un inflexion propre à la diffusion vers l'avant uniquement à partir d'angle typiquement de l'ordre de 110° ou supérieurs (voir Hartman and Domingue (1998)). Il est donc probable que le modèle ne soit pas suffisamment contraint, par l'absence de données à phase élevée, pour calculer des valeurs réalistes du paramètre c et bien que celles calculées indiquent une forte rétrodiffusion.

McGuire and Hapke (1995) indiquent que les valeurs de c les plus élevées peuvent être trouvées pour des matériaux diélectriques avec une haute densité de diffuseurs internes ou pour des métaux à la surface rugueuse. Hartman and Domingue (1998) trouve $c = 1.034$ pour des particules catégorisées comme ayant

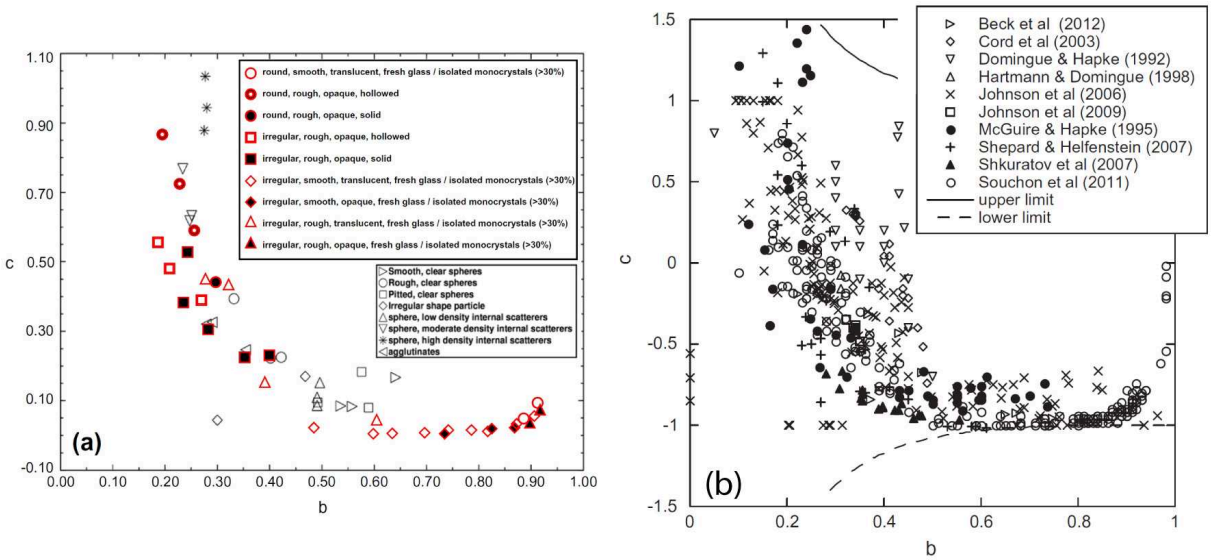


FIGURE 5.28 – Les paramètres b et c retranscrits pour de nombreuses expériences ou observations. (a) issu de Souchon et al. (2011), (b) issu de Hapke (2012).

une forte densité de diffuseurs interne également, ceux-ci pouvant être des micro-fissures ou des bulles par exemple. Cependant, il est important de préciser que ces particules sont artificielles et sphériques, ne représentant pas des particules que l'on trouvera sur une surface cométaire donc. De nombreux auteurs (Domingue and Hapke, 1992; McGuire and Hapke, 1995; Cord et al., 2003; Souchon et al., 2011; Beck et al., 2012; Hapke, 2012; Fernando, 2014; Schmidt and Fernando, 2015; Pilorget et al., 2016) ont mis en évidence ou ont étudié la relation entre les paramètres b et c, conduisant à la désormais célèbre « *hockey stick relation* » (voir figure 5.28). Il s'avère en effet qu'après de nombreuses expériences, les valeurs de b et c se distribuent selon une courbe en « L » : pour les grandes valeurs de b (diffusion isotrope avec des lobes bas et larges) on trouve de faibles valeurs de c (diffusion vers l'avant) et inversement.

Les valeurs de b et c déterminées ici se rapprochent de celles de Domingue and Hapke (1992), calculées à partir d'observations des deux hémisphères du satellite Europe (en disque intégré). Il n'y a pas lieu de faire un quelconque rapprochement car ces valeurs sont explicitement indiquées par Hapke (2012) comme souffrant d'un problème de mesure ou d'ajustement du modèle. Est-ce le cas également pour nos dérivations ? Pas obligatoirement, ces valeurs peuvent tout à fait indiquer des particules rétrodiffusantes mais avec un lobe de diffusion intermédiaire (ni très directionnelle – ou anisotrope – ni très isotrope). Ces particules, d'après les figures 5.28 présentant la relation entre b et c, pourraient être plutôt opaques et rugueuses, cela expliquerait les valeurs de c obtenues. En revanche, elles devraient être irrégulières afin d'être compatibles avec les valeurs de b que l'on a déterminés. Il est cependant possible que la morphologie des particules observées ici n'ait pas été testé en laboratoire et dans les différentes mesures compilées par Hapke (2012) et la porosité pourrait par exemple jouer un rôle important dans la détermination de ces paramètres. Des mesures sur des matériaux analogues seraient alors utiles afin d'explorer les gammes de b et c rencontrées dans ces situations.

5.5 Limites de l'étude

Le paramètre $\bar{\theta}$ est lié à la résolution spatiale des observations puisqu'il est censé rendre compte de l'angle moyen des pentes intégrées à l'intérieur du pixel (Hapke, 1984). La résolution spatiale n'étant pas la même pour VIRTIS-H que pour VIRTIS-M (voir les histogrammes de la résolution des figures 5.5, 5.6 en comparaison à 5.17), il est difficile de lui attribuer la même signification dans ces deux cas en raison des échelles de reliefs différentes pouvant influencer sur sa valeur. De plus, la résolution varie même au sein de chaque jeu de données en raison du caractère global de l'étude. Cela nous oblige à intégrer de nombreuses observations qui, dans le cas de Rosetta, n'ont pas été acquises à la même distance et donc à la même résolution spatiale. Cependant, plusieurs études ont montré que ce sont les plus petites échelles – millimétriques à centimétriques – qui jouent un rôle important (Shepard and Campbell, 1998; Helfenstein and Shepard, 1999; Cord et al., 2003)). Dans ce cadre, il n'est pas nécessaire de tenir compte des différentes résolutions spatiales auxquelles VIRTIS a observé. Le facteur limitant pour la détermination de ce paramètre est en revanche la couverture en angle de phase comme on l'a déjà mis en avant. La détermination de $\bar{\theta}$ gagnerait en robustesse si notre gamme de phase, allant de 20° à 110°, était plus complète. C'est principalement pour cette raison que pour la comparaison entre les différents jeux de données de VIRTIS-H et VIRTIS-M, on préfèrera utiliser un modèle qui ne tient pas compte de ce paramètre comme celui de Lommel-Seeliger.

Comme on vient de le discuter, il est probable que l'utilisation de la fonction de phase à deux lobes ne fournissent pas une meilleure estimation des paramètres photométriques. D'une part car la surface est fortement rétrodiffusante, et d'autre part parce que quantifier la faible part de diffusion vers l'avant, si elle est présente, nécessite d'avoir des observations à plus grands angles de phase. Introduire la fonction de phase à deux lobes sur un jeu de données incomplet contribue à augmenter l'écart dans les valeurs d'albédo de diffusion simple dérivées avec les modèles de Lommel-Seeliger et de Hapke simplifié (voir figure 5.29). Cependant, une partie de cet écart est aussi due à l'utilisation du paramètre $\bar{\theta}$ comme discuté dans la sous-section 5.4.6.1 car si l'on regarde ce même écart mais pour chacun des modèles pris individuellement (figure 5.30) on voit qu'il est difficile d'en ressortir une quelconque tendance. Le cas VIRTIS-H se démarque dans cette même figure 5.30 par un écart très variable en raison des valeurs d'albédo qui sont elles-mêmes peu contraintes pour chaque ajustement pris individuellement (figures 5.23 et 5.25) ; cela est valable aussi bien avec le modèle de Lommel-Seeliger qu'avec le modèle de Hapke simplifié. L'origine de cette dispersion se trouve à nouveau dans la calibration. Pour VIRTIS-M, les écarts sont moins important dans le visible pour le modèle de Hapke par rapport au modèle de Lommel-Seeliger mais on observe la tendance inverse dans l'infrarouge.

Que ce soit à propos de la détermination du paramètre $\bar{\theta}$ ou de la fiabilité relative à l'utilisation d'une fonction de phase de Henyey-Greenstein à deux lobes, les facteurs limitant sont à la fois la résolution (variable) des observations et le manque de couverture aux grands angles de phase. Dans ces conditions on préfèrera utiliser le modèle de Lommel-Seeliger avec une fonction de phase à un lobe. Ce modèle reste adapté dans la description photométrique des surfaces sombres bien qu'il ne prenne pas en compte certains paramètres introduits par Hapke dans son modèle. On a cependant vu dans la section 5.3.2 que certains d'entre eux n'étaient pas nécessaires dans notre cas (diffusion multiple) voir non applicables sur le jeu de données utilisé (effet d'opposition).

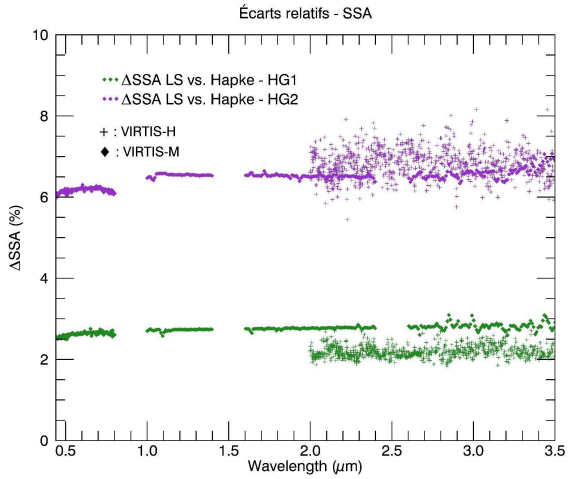


FIGURE 5.29 – Écarts relatifs des albédos de diffusion simple dérivés pour VIRTIS-M (losange) et VIRTIS-H (croix) avec les modèles de Lommel-Seeliger et Hapke et avec une fonction de phase à un lobe (vert) et à deux lobes (violet).

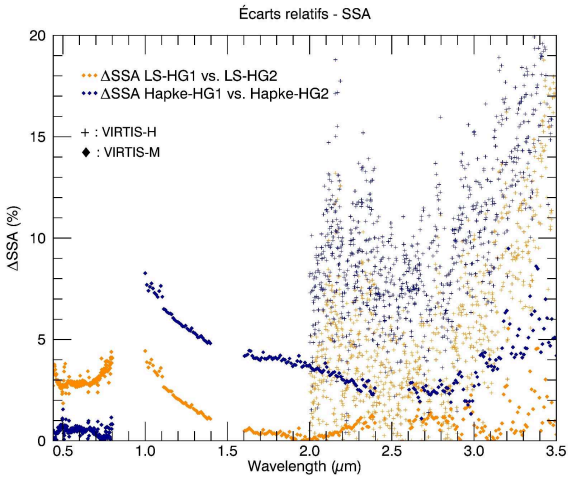


FIGURE 5.30 – Écarts relatifs des albédos de diffusion simple dérivés pour VIRTIS-M (losange) et VIRTIS-H (croix) avec les modèles de Lommel-Seeliger (orange) et Hapke (bleu). L'écart est ici selon la version de la fonction de phase mais chacun des modèles pris séparément.

Une des limites de cette étude est de globaliser la détermination des paramètres photométriques. Plusieurs hypothèses et contraintes assez fortes sont en effet réalisées : mélange d'observations à différentes résolutions spatiales, hypothèses de b et $\bar{\theta}$ constant lorsque l'on inverse le modèle pour réaliser des cartes d'albédo de diffusion simple ou de pentes spectrales. Bien qu'il soit intéressant de déterminer ces paramètres photométriques à l'échelle globale pour un corps qui est globalement homogène, il est important de garder en tête que la nature des terrains, qui peut jouer sur ces paramètres, varie à la surface de 67P.

L'image 5.31, d'environ 350 mètres de côté, illustre deux cas de terrains typiques que l'on rencontre à la surface de la comète (bien qu'il en existe d'autres). Sur la moitié supérieure droite de l'image on observe ainsi un terrain d'apparence rugueuse, très fracturé, érodé et accidenté. En bas à gauche la surface est recouverte d'un régolithe, un manteau de poussière qui apparait donc lisse, sans reliefs abrupts et fractures sur la majorité de la surface occupé. Ces deux types de terrains ont-ils des paramètres photométriques identiques ? Il est impossible de le savoir à travers une étude globale. Et faire l'hypothèse

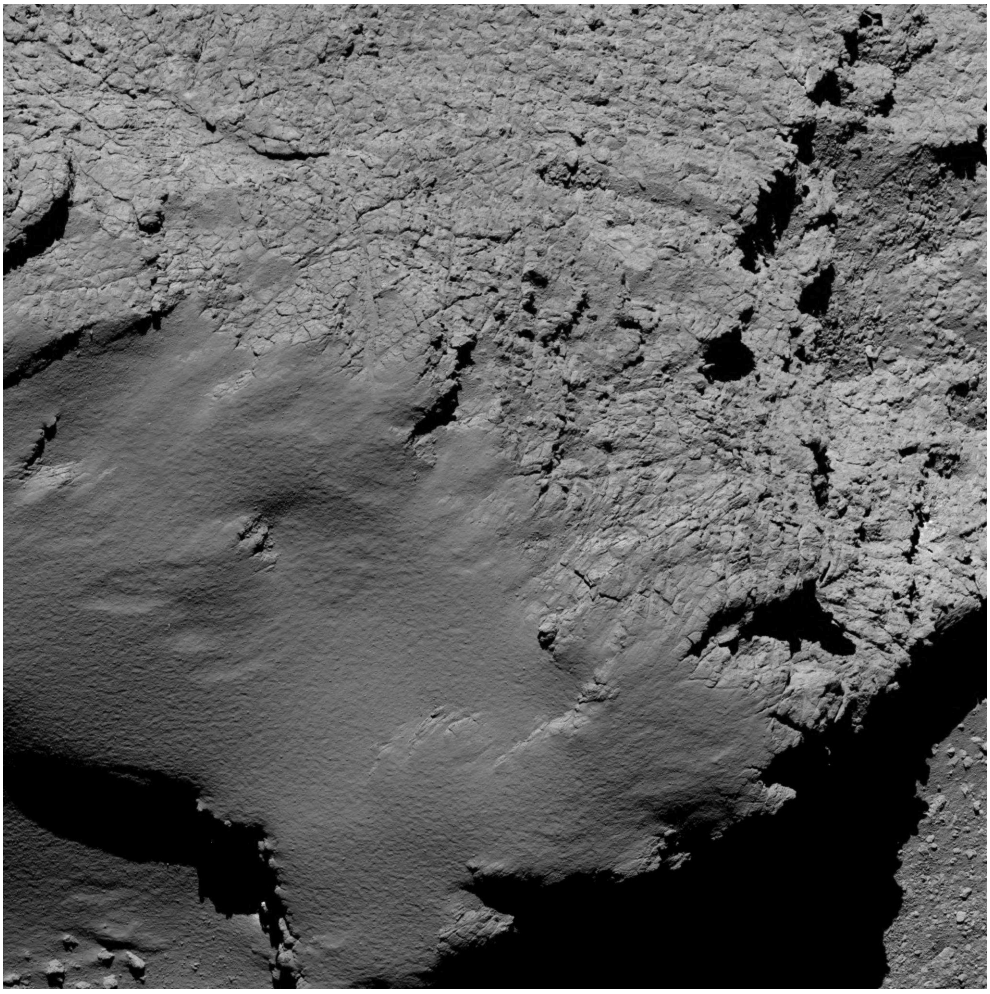


FIGURE 5.31 – Vu rapprochée de 67P prise par OSIRIS, à 8.9 km la résolution atteint ici 17 cm/pixel. La zone « lisse » appartient à la région Ma'at et la zone plus accidentée, « rugueuse » à la région Hathor. Cette image illustre parfaitement le problème d'étudier la photométrie moyenne d'une surface. Crédit : ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team MPS/UPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA.

d'un paramètre d'asymétrie et d'une fonction d'ombrage constant pour ces deux terrains n'est pas réaliste si on veut les discriminer.

Dans cette situation, il est alors intéressant de retrouver les paramètres photométriques sur des régions restreintes pour essayer de savoir s'ils possèdent des comportements différents.

5.6 Étude locale

Les images de la caméra d'OSIRIS visibles en figures 5.31 et 2.5a page 23 illustrent l'intérêt d'une étude photométrique à une échelle spatiale plus restreinte que l'étude précédente. Les paramètres photométriques d'une surface dépendent en effet de la texture du milieu particulaire qu'elle constitue. La texture peut désigner ici la taille des grains ou la compaction du milieu et de manière générale toute propriété influant sur la lumière renvoyée par la surface en direction du détecteur. Lorsque ces paramètres sont

dominés par l'échelle inférieure au centimètre, ils ne peuvent être évalués précisément depuis l'orbite et on se contente dans ce cas de différencier les terrains selon leurs aspects macroscopiques (à l'échelle du centimètre au mètre pour OSIRIS). Sur les images évoquées précédemment, on en distingue ainsi plusieurs types : des terrains lisses que l'on appellera aussi terrains couverts de poussières ou de régolithe car l'abondance de poussières est marquée (le mot régolithe n'est pas relié à un processus de formation quelconque de ces terrains) et des terrains accidentés, irréguliers, plutôt rocailleux (ce qui ne signifie pas qu'ils ne sont pas recouvert de poussières également mais simplement qu'elle n'est pas présente en abondance). Lors d'une étude photométrique globale, aucune distinction n'est faite entre ces différents terrains, on obtient donc des paramètres photométriques qui ne reflètent pas les propriétés de chacun d'eux. L'intérêt de cette étude, menée à l'échelle locale, est donc de tenter de distinguer des comportements photométriques différents selon les cibles observées. Ces cibles étant choisies selon leur morphologie.

5.6.1 Données utilisées

La région d'Imhotep présente les deux types de morphologies évoquées précédemment, à savoir des terrains lisses et irréguliers. C'est ce que relate la figure 5.32, issue de Auger et al. (2015), où les zones en bleues sont les terrains couverts de poussières, et les zones en oranges sont les terrains découverts, accidentés. Imhotep a l'avantage de se trouver au bout d'un des deux lobes de 67P mais aussi d'être proche de l'équateur, faisant d'elle une région éclairée pendant presque toute la durée de la mission, ce qui en fait une région de choix pour un suivi sur le long terme. Dans cette étude et pour les mêmes raisons que dans l'analyse à l'échelle globale, on utilise des données acquises sur une période restreinte (entre MTP006 et MTP015) afin de limiter les impacts de l'activité du noyau. Ces données ont été sélectionnées d'après les critères de la carte géologique de la figure 5.32. Sur un des cubes VIRTIS utilisés (figure 5.33) sont tracés avec le même code couleur que la figure 5.32 les régions d'intérêts retenues. La zone en orange représente donc des terrains accidentés, la zone en bleu des terrains recouverts de poussières. Les cubes utilisés (entre 26 et 30 par zones, représentant environ 20000 pixels dans chaque zone et pour chaque canal – visible et infrarouge) sont indiqués en annexe 9.5.3 page 324.

Comme pour l'étude globale, on prend soin de ne pas conserver les géométries extrêmes ($i > 60°$, $e > 60°$, $g < 20°$) qui s'accompagne généralement d'une dispersion plus grande des données et donc d'une incertitude plus grande sur la détermination des paramètres photométriques. Les distributions de la réflectance à 0.55 µm et 2.3 µm pour les deux zones sélectionnées sont représentées dans la figure 5.34. La gamme d'angles de phase est plus restreinte que pour l'étude globale mais les données ont été choisies de façon à obtenir des valeurs allant jusqu'à au moins 90°. Malgré cela, la restriction en phase fait qu'il est difficile d'utiliser la version simplifié du modèle de Hapke tout comme c'était le cas pour VIRTIS-H dans la section 5.4.5. Les tests menés n'ont ainsi pas permis de déterminer $\bar{\theta}$. De même, le peu de données ne suffit pas à contraindre suffisamment un modèle utilisant la fonction de phase de Henyey-Greenstein à deux lobes. Pour ces raisons, seul le modèle de Lommel-Seeliger a été appliqué à l'étude d'Imhotep. Enfin, la méthode décrite dans la section 5.3.6 a été utilisé (hormis le procédé utilisé pour déterminer $\bar{\theta}$).

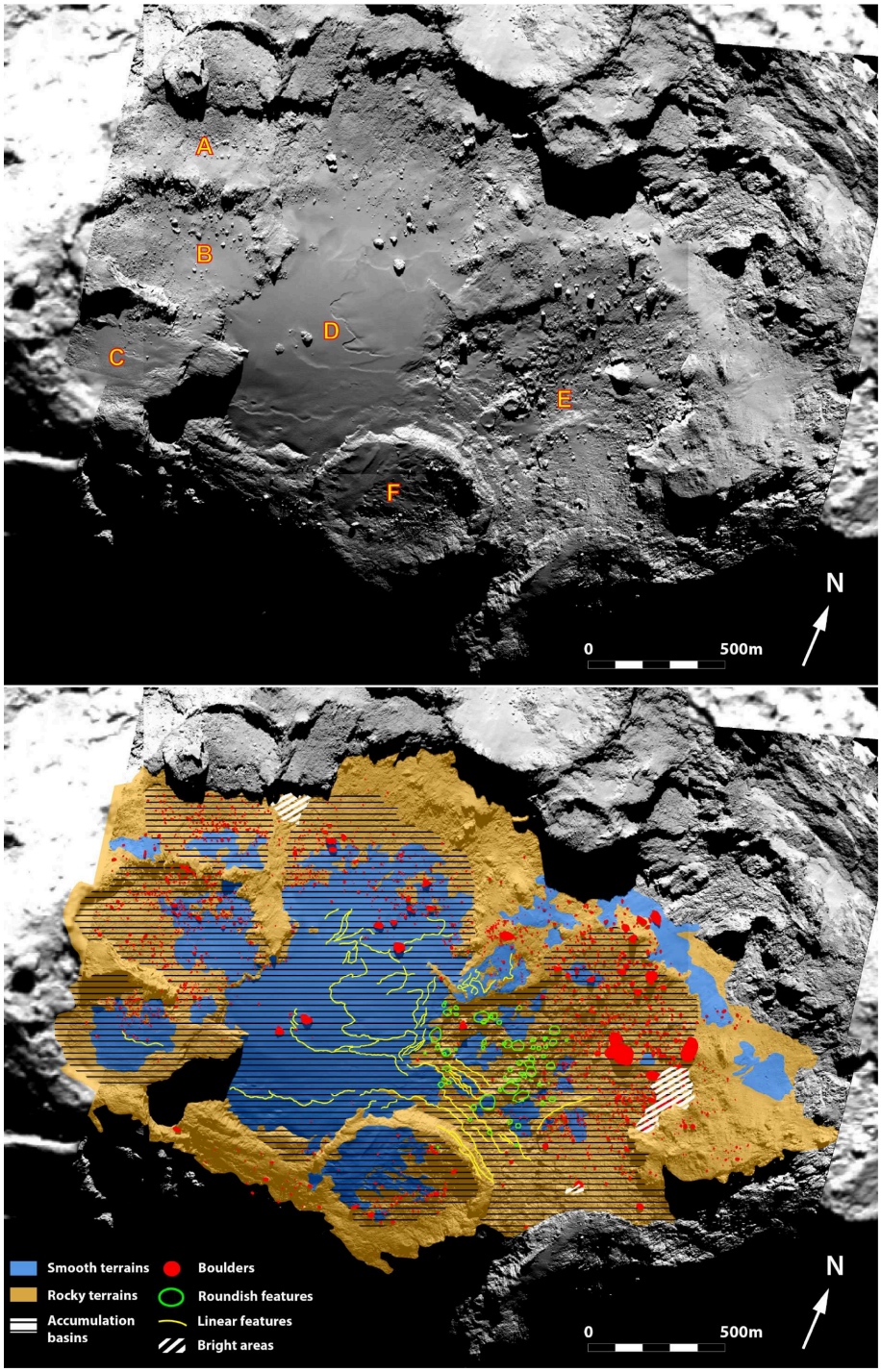


FIGURE 5.32 – Mosaïque d'image OSIRIS et carte géologique de la région d'Imhotep issue de Auger et al. (2015). Les types de terrains sélectionnés pour cette étude apparaissent en bleu (régolithe) et orange (irréguliers).

5.6.2 Paramètres photométriques

Les figures 5.35a et 5.35c donnent l'albédo de diffusion simple et le paramètre d'asymétrie des zones d'intérêt sélectionnées sur la région d'Imhotep ainsi qu'à l'échelle globale tel que déterminés dans la

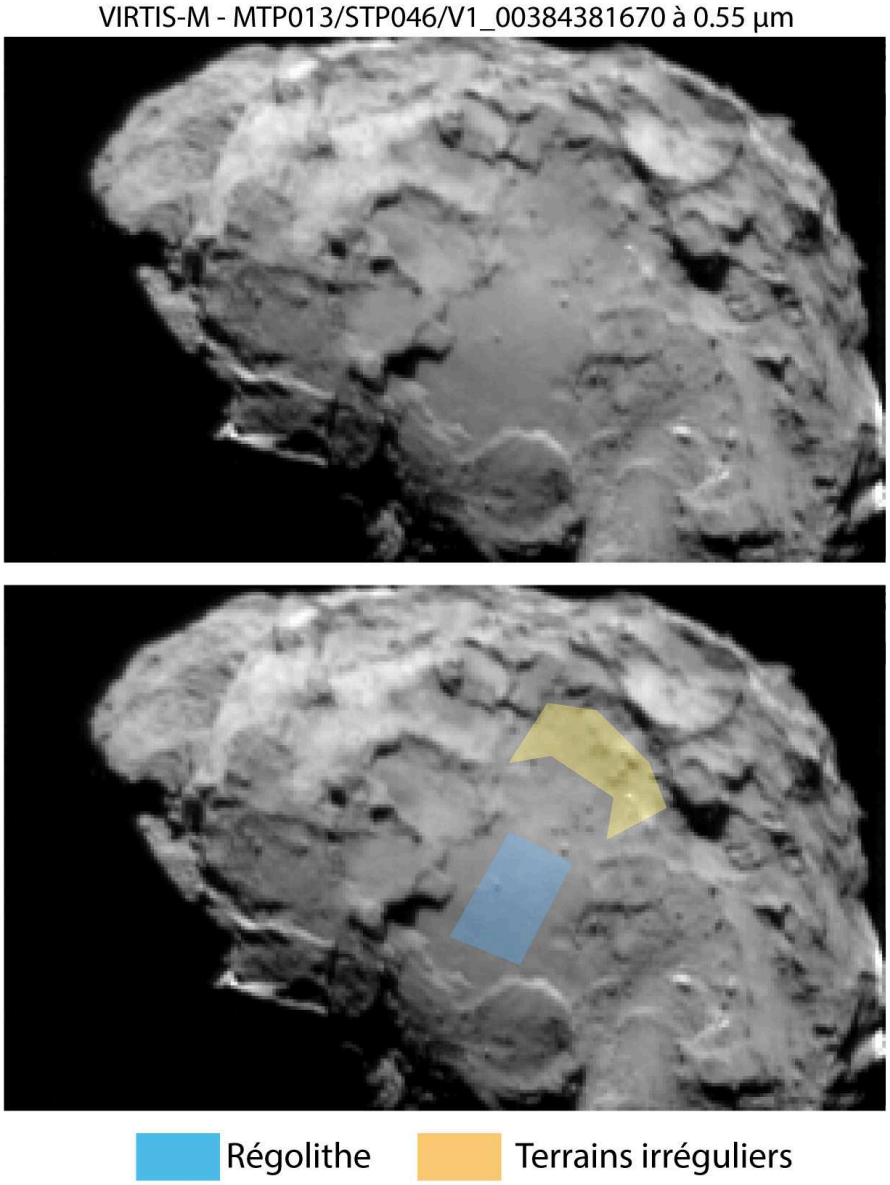
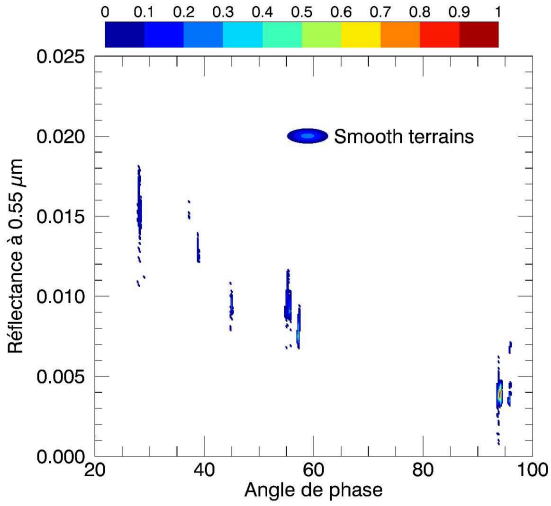


FIGURE 5.33 – Cube VIRTIS MTP013/STP046/V1_00384381670 à 0.55 µm où la région d'Imhotep est visible. Les régions d'intérêts sélectionnées apparaissent en bleu et jaune.

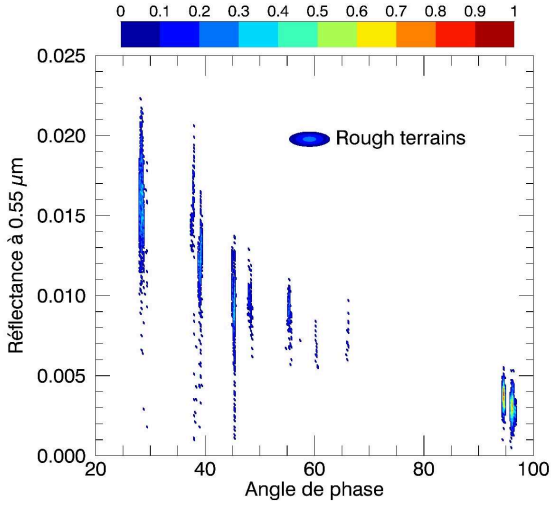
sous-section 5.4.3. Le tableau 5.2 résume ces différentes grandeurs à 0.55 µm et 2.8 µm ainsi que la pente spectrale calculée sur le spectre de l'albédo de diffusion simple.

Dans le visible comme dans l'infrarouge, on note que l'albédo de diffusion simple des terrains irréguliers est le même que celui déterminé à l'échelle globale (voir figure 5.35a). Celui des terrains abondants en poussières est en revanche plus important et l'écart entre ces derniers et les terrains irréguliers augmente avec la longueur d'onde : il est de 7% dans le visible et de 11% dans l'infrarouge. Cela se traduit en terme de pente spectrale (calculée suivant les équations 5.12 et 5.13 page 93) qui est donc plus importante pour les terrains lisses que pour les terrains irréguliers :+2% dans le visible et+18% dans l'infrarouge.

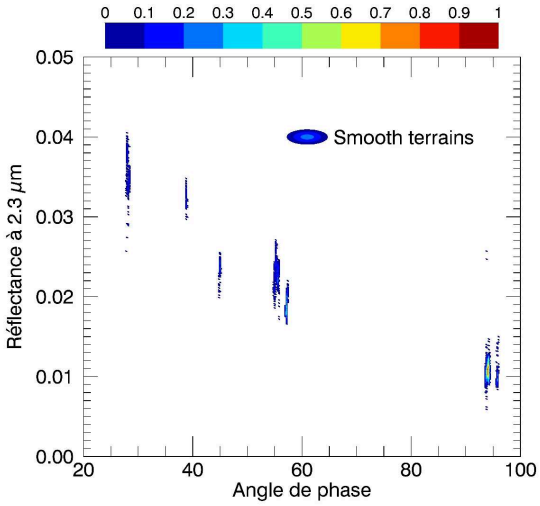
L'écart constaté au niveau de la bande d'absorption et la profondeur de celle-ci peut-être évalué dans la figure 5.35b où les spectres ont été normalisé à 2.8 µm. Ce sont les terrains accidentés qui présentent une



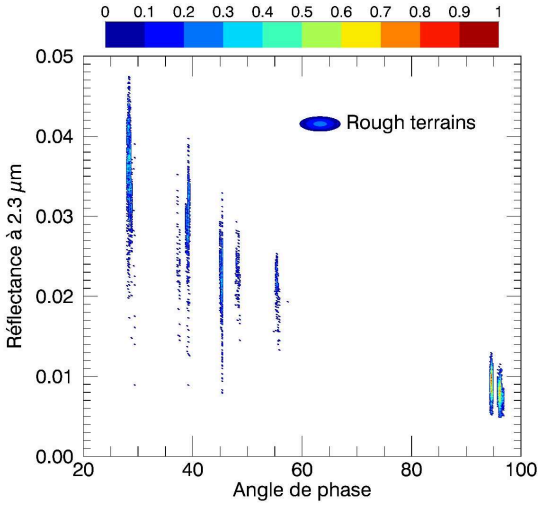
(a) Distribution de la réflectance moyennée sur 10 canaux autour de 0.55 µm pour les terrains lisses.



(b) Distribution de la réflectance moyennée sur 10 canaux autour de 0.55 µm pour les terrains irréguliers.



(c) Distribution de la réflectance moyennée sur 10 canaux autour de 2.3 µm pour les terrains lisses.



(d) Distribution de la réflectance moyennée sur 10 canaux autour de 2.3 µm pour les terrains irréguliers.

FIGURE 5.34 – Densité (échelle normalisée) de la réflectance moyennée sur 10 canaux autour de 0.55 µm et de 2.3 µm des observations VIRTIS-M retenues pour l'étude photométrique d'Imhotep.

plus grande profondeur de bande en comparaison aux terrains lisses et à la surface dans sa globalité.

Pour le paramètre d'asymétrie (voir figure 5.35c), les terrains couverts de poussières présentent une rétrodiffusion moins importante que les terrains irréguliers avec un écart de 9% dans le visible et de 19.5% dans l'infrarouge, l'étude globale renvoie une situation intermédiaire bien que très légèrement que plus proche des terrains lisses dans l'infrarouge.

	Étude globale	Terrains irréguliers - Imhotep	$\longrightarrow$	Terrains lisses - Imhotep
$SSA_{0.55\mu m}$	0.051	0.052	+7%	0.056
$SSA_{2.8\mu m}$	0.139	0.136	+11%	0.151
$B_{0.55\mu m}$	−0.42	−0.44	+9%	−0.40
$B_{2.8\mu m}$	−0.37	−0.41	+19.5%	−0.33
$S_{VIS}(\mu m^{-1})$ (1)	1.94	1.97	+2%	2.01
$S_{IR}(\mu m^{-1})$ (1)	0.29	0.28	+18%	0.33

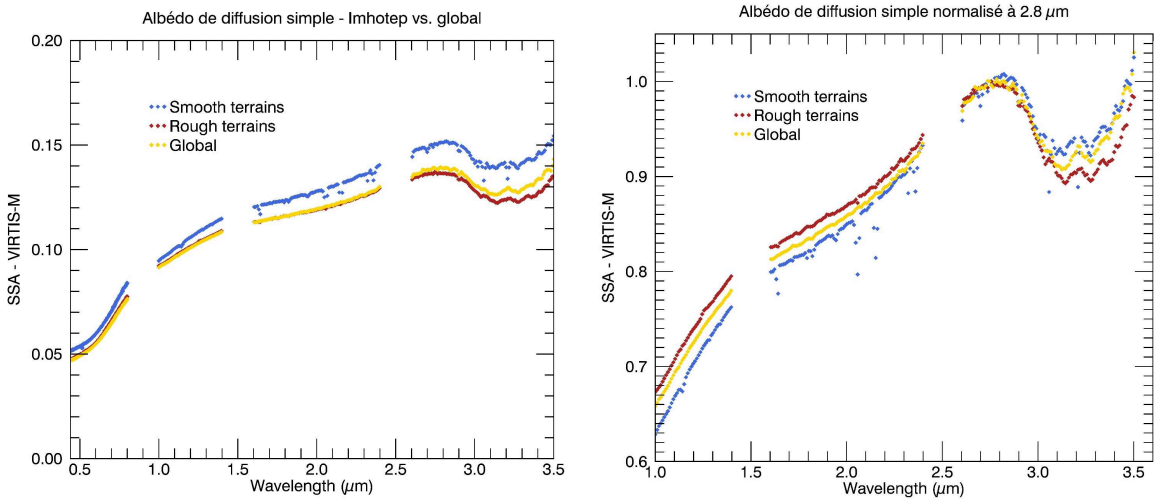
TABLE 5.2 – Paramètres photométriques des zones sélectionnées sur Imhotep comparé aux paramètres globaux. L'incertitude sur ω et b est de l'ordre de 10^{-4} ou inférieure. (1) voir les équations 5.12 et 5.13 page 93.

5.6.3 Discussion

La surface de 67P ne présente que de faible hétérogénéités spectrales entre les différentes régions ou entre différentes zones arbitraires (Capaccioni et al., 2015; Ciarniello et al., 2015; Quirico et al., 2016). De manière générale, la composition est la même sur l'ensemble de la surface et il n'existe pas une diversité telle que l'on peut retrouver sur d'autres corps du Système Solaire. Cette étude est la première à étudier la photométrie des terrains morphologiquement distinct au sein d'une région précise de la surface de 67P. Elle ne s'intéresse non pas aux caractéristiques globales de cette surface mais bien aux particularités pouvant se trouver à une échelle qui n'est pas toujours prise en compte.

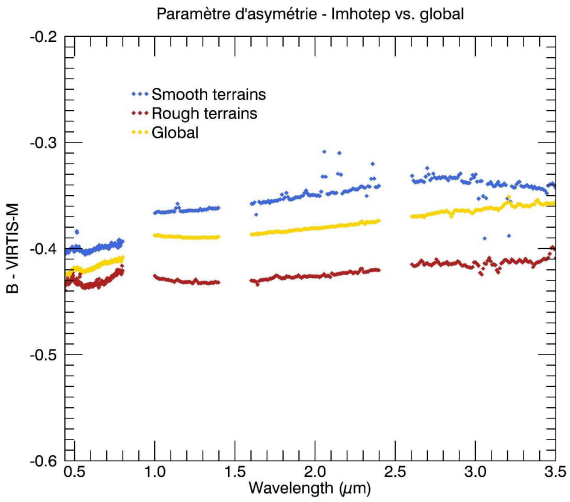
Les écarts constatés dans les niveaux absolus des albédos de diffusion simple et des pentes spectrales doivent être interprétés à la lumière de plusieurs processus. Les terrains habituellement plus clairs à la surface de 67P sont généralement associés à une pente moins rouge, ces indicateurs étant interprétés comme l'indice d'une plus forte teneur en glace d'eau (Fornasier et al., 2015; Fornasier et al., 2016; Filacchione et al., 2016a; Ciarniello et al., 2016) ; c'est par exemple le cas de la région de Hapi qui est par ailleurs une région d'aspect lisse. Cette tendance n'est pas observée ici : le terrain lisse sélectionné sur la région d'Imhotep présente un albédo de diffusion simple plus élevé mais une pente spectrale plus rouge que le terrain accidenté. Ces observations ne semblent donc pas compatibles avec l'interprétation d'une teneur en glace d'eau plus importante et celle-ci ne peut s'appliquer.

Il est dès lors nécessaire de passer en revue d'autres processus pour essayer d'expliquer la différence observée entre les deux types de terrains. L'altération spatiale est par exemple à l'œuvre sur tous les objets sans atmosphère du Système Solaire. Ceux-ci subissent le bombardement incessant de micrométéorites, des rayons cosmiques et sont frappés par le vent solaire, ce qui altère leurs surfaces et modifie les propriétés spectrales en surface : c'est ce phénomène que l'on appelle l'altération spatiale (ou « *space weathering* ») et dont les effets peuvent être variés. Parmi ces effets, l'étude de Lantz et al. (2013) rapporte notamment un spectre plus bleu observé sur des astéroïdes de type C (carbonés) par rapport à leurs météorites correspondantes les CM (chondrites carbonées), phénomène dont l'altération spatiale serait responsable. D'autres cas de bleuissement ont été observé dans des expériences de bombardement simulant cette altération (voir par exemple Lantz et al. (2017) et les références de la table 1). Selon ces



(a) Albédo de diffusion simple des zones sélectionnées dans la région d'Imhotep.

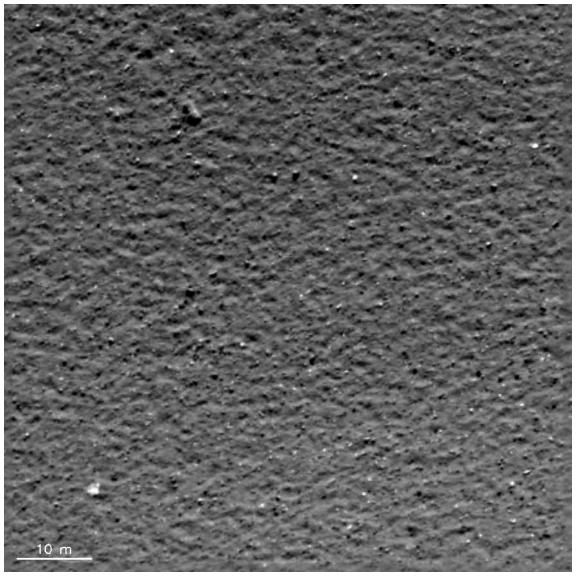
(b) Albédo de diffusion simple des zones sélectionnées dans la région d'Imhotep normalisé à 2.8 µm.



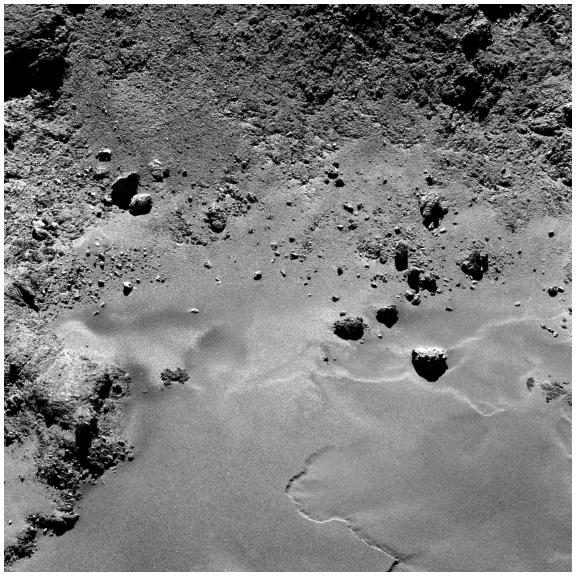
(c) Paramètre d'asymétrie des zones sélectionnées dans la région d'Imhotep.

FIGURE 5.35 – Paramètres photométriques des terrains couverts lisses ou irréguliers sélectionnés dans la région d'Imhotep dans la période MTP006-MTP015 avec les données VIRTIS-M. Les paramètres issus de l'étude globale (voir 5.4.3) ont été ajouté pour comparaison.

interprétations, on peut penser que les terrains accidentés, dont la pente est moins rouge que les terrains lisses, ont ainsi été exposés plus longtemps aux acteurs responsables de l'altération spatiale. Cette interprétation est renforcée par le fait que ces terrains sont vraisemblablement exposés depuis plus longtemps que les terrains lisses. En effet, le matériau présent sur ces derniers provient de l'érosion des terrains accidentés d'après Auger et al. (2015) et non de la redéposition des poussières, phénomène efficace sur d'autres régions mais pas sur Imhotep (Thomas, N. et al., 2015). Constitués de poussières, les terrains lisses de la région d'Imhotep sont également sujet à des processus mettant à jour des couches de matériau plus récentes comme l'ont montré le suivi de la région (Groussin, O. et al., 2015). L'éjection des poussières proposé par Filacchione et al. (2016a) peut également être évoquée puisqu'elle conduira au même résultat. Cependant, il est nécessaire de considérer ici l'échelle de temps qui est à l'œuvre pour les



(a) Image OSIRIS NAC du régolithe dans la région de Ash, similaire à celui d'Imhotep. La résolution est de 14 cm/pixel. Image NAC_2014-10-20T11.38.55.625Z_ID10_1397549400_F22 tirée de Thomas, N. et al. (2015).



(b) Image OSIRIS NAC (N20140929T132930598ID30F22) de la région Imhotep illustrant les types de terrains sélectionnés. La résolution est de 20 cm/pixel environ. La granulométrie est moins fine sur les terrains accidentés en haut de l'image que sur les terrains couvert de poussières.

FIGURE 5.36 – Images OSIRIS de la NAC (« *Narrow angle camera* ») illustrant les terrains sélectionnés pour l'étude locale.

processus d'altération. Celle-ci est bien supérieure à la période orbitale de 67P (environ 6 ans) au cours de laquelle la comète subira un « rafraîchissement » de sa surface en raison de la sublimation des glaces et de l'éjection de la poussière en surface. L'altération spatiale n'est donc, dans le cas des comètes, pas l'hypothèse favorite pour expliquer les différences spectrales observées.

La profondeur de la bande centrée à 3.2 µm est un indicateur de la quantité en matériaux organiques présent à la surface. Le faible écart constaté entre les deux types de terrains est également ce que l'on observe dans les études de Filacchione et al. (2016a) et Ciarniello et al. (2016) où le centre de la région d'Imhotep possède effectivement une profondeur de bande d'absorption plus faible par rapport à la périphérie. On notera cependant que l'écart n'est pas aussi grand qu'entre la région de Hapi et les autres par exemple. Filacchione et al. (2016a) rapporte aussi la corrélation entre la pente spectrale et la profondeur de bande à 3.2 µm : plus la pente est faible (dans le visible et l'infrarouge), plus la profondeur de la bande est importante. On retrouve ce résultat ici. Dans les études de Filacchione et al. (2016a) et Ciarniello et al. (2016), les auteurs relient la pente spectrale, la profondeur de bande et son centre à la teneur en glace d'eau à la surface. Dans le cas présent, le manque de données et leur intégration sur un temps assez long ne permet pas d'en tirer les mêmes conclusions. La profondeur de bande des organiques comme indicateur de leur quantité en surface doit être étudiée en tenant compte de la température. Si celle-ci est trop élevée, elle viendra en effet influencer l'aile droite de la bande. Ce peut être le cas pour certains spectres utilisés ici où, pour MTP014 ou MTP015 par exemple, les températures peuvent atteindre 250K sur ces régions. Cela signifie qu'à partir de 3.0 µm environ, ils doivent être étudiés avec précaution et qu'une correction pour retirer l'émission thermique devrait être faite.

Les différences observées dans l'albédo de diffusion simple et le paramètre d'asymétrie s'explique difficilement par des phénomènes liés à l'activité et de façon très peu probable par l'altération spatiale. La composition reste globalement la même entre les régions observées mais peut jouer un rôle localement, notamment par qu'elle peut influencer la texture des terrains qui est en réalité à l'origine des variations observées ici. Rugosité, taille des grains, porosité sont des paramètres cruciaux puisqu'ils vont influencer les spectres et donc provoquer ces différences. Il reste cependant difficile de distinguer leurs effets respectifs : des efforts dans la modélisation de ces effets de même que dans leur étude expérimentale sont nécessaires pour mieux les comprendre.

Bien que la gamme d'angles de phase ne nous permette pas de contraindre parfaitement le paramètre d'asymétrie, elle est la même pour les deux zones étudiées et la comparaison est donc possible. Les valeurs indiquent ainsi que les terrains couverts de régolithe rétrodiffusent moins que les terrains irréguliers. Cette différence trouve son origine dans la forme et l'opacité des particules constituants le sol, et donc potentiellement dans la composition avec un possible effet de la teneur en glace si celle-ci est impliquée. La différence observée dans ce paramètre entre les deux terrains est d'une importance cruciale. En effet, la cartographie de l'albédo de diffusion simple réalisée en section 5.4.4 page 94 ainsi que les études de Filacchione et al. (2016a) et Ciarniello et al. (2016) étudient les propriétés de la surface de 67P durant plusieurs MTP à partir du calcul du spectre de l'albédo de diffusion simple qui est lui-même inversé à partir de l'équation 5.10. Pour cela, il est nécessaire de faire l'hypothèse que la paramètre d'asymétrie b et la fonction d'ombrage $S(\bar{\theta})$ sont constants sur l'ensemble de la surface en plus de l'être au cours du temps. Or, on voit avec la présente étude que le paramètre b n'est pas le même selon les terrains (sa variation temporelle ne peut être évaluée par manque de données étendue en phase sur une période restreinte). On notera ainsi que faire l'hypothèse d'un paramètre b constant augmente l'incertitude sur la dérivation du spectre d'albédo de diffusion simple et donc sur le calcul d'indicateurs spectraux basés sur ce spectre.

Pour approfondir cette étude il serait nécessaire de l'étendre à l'ensemble de la surface. Cela consisterait alors à trouver des zones relativement proches géographiquement et de la même nature pour vérifier si la différence observée ici est bien retrouvée ailleurs et dans les mêmes tendances. Cela reste cependant difficile pour nombre d'endroits car l'ensoleillement ou les observations disponibles ne permettent pas toujours une disponibilité accrue et la construction d'une courbe de phase suffisamment complète. Dans les périodes plus lointaines de la mission, au-delà de MTP015 typiquement, il n'est ainsi plus possible de couvrir une large gamme d'angle de phases sans devoir intégrer une période de temps très longue. Or, c'est ensuite l'activité qui peut venir modifier la surface sur de longues périodes et donc biaiser ce type d'étude.

Conclusion

L'étude photométrique globale a permis de dériver les paramètres photométriques de la surface de 67P tout en comparant deux modèles couramment utilisés dans les analyses de la surface des corps du Système Solaire. Une étude à l'échelle globale de l'albédo de diffusion simple (sous certaines hypothèses)

et de la pente spectrale a été réalisé afin d'étudier les faibles variations que présente la surface. Cette première phase a été complétée dans un second temps par une étude à l'échelle locale tenant compte de deux types de terrains géologiquement différents, en l'occurrence ceux couverts de poussières et des terrains nus et plus accidentés. Un des points importants à été de mettre en évidence les écarts entre VIRTIS-M et VIRTIS-H. Dans l'optique d'une amélioration future de la calibration des données de VIRTIS-H, il est important de caractériser en détails ces écarts dans différents cas d'études. C'est ce que l'on s'attache à faire dans le prochain chapitre grâce à une étude thermique comparative entre VIRTIS-M et VIRTIS-H.

La conclusion du présent chapitre sera détaillée dans la section dédiée de cette partie, à la page 129.

Chapitre 6

Étude thermique de la surface de 67P : caractérisation des températures obtenues par VIRTIS-M et VIRTIS-H

6.1 Enjeux, méthodologie et contraintes

Le rayonnement émis par une surface planétaire n'est pas uniquement constitué de la lumière réfléchie, le rayonnement thermique contribue également en grande partie au bilan énergétique. VIRTIS-H et VIRTIS-M infrarouge sont les deux seuls instruments à bord de Rosetta à observer dans l'infrarouge thermique et donc à pouvoir être utilisés pour calculer la température de la surface ou des poussières dans la coma. L'étude des températures avec VIRTIS-M infrarouge fût principalement menée par F.Tosi à l'IAPS, Italie (Tosi et al., 2017, soumis – utilisant la méthode publiée dans Tosi et al. (2014)) et par C. Leyrat du LESIA (Leyrat et al. (2015a,b, 2016)). La défaillance du cryocooler de VIRTIS-M infrarouge en avril 2015 l'a rendu inopérant et a donc mis un arrêt à la cartographie systématique de la température à la surface de 67P. VIRTIS-H est donc devenu à ce moment le seul instrument sur lequel se baser pour calculer ces températures.

Cependant, sa couverture spatiale est moins importante et la tache réalisée est par définition différente de VIRTIS-M car plus locale. Pour pallier à ce manque en couverture spatiale globale et pour compléter les observations réalisées localement, des *rasters* ont été réalisés à plusieurs reprises. Ces modes d'observations consistent à balayer le champ de vue grâce à la sonde de façon à scanner en x et y le noyau, le couvrant ainsi même avec le champ de vue restreint de VIRTIS-H (voir figure 6.1). Les observations tirées de ces sessions restent cependant tributaires de la distance entre 67P et la sonde et donc de la résolution spatiale au moment de l'acquisition, celle-ci étant souvent importante puisque scanner le noyau nécessite dans tous les cas d'être à une distance minimum de ce dernier. Enfin, VIRTIS a parfois profité de rasters définis par d'autres instruments, provoquant alors un échantillonnage non optimal pour notre instrument mais permettant d'obtenir une plus grande couverture spatiale.

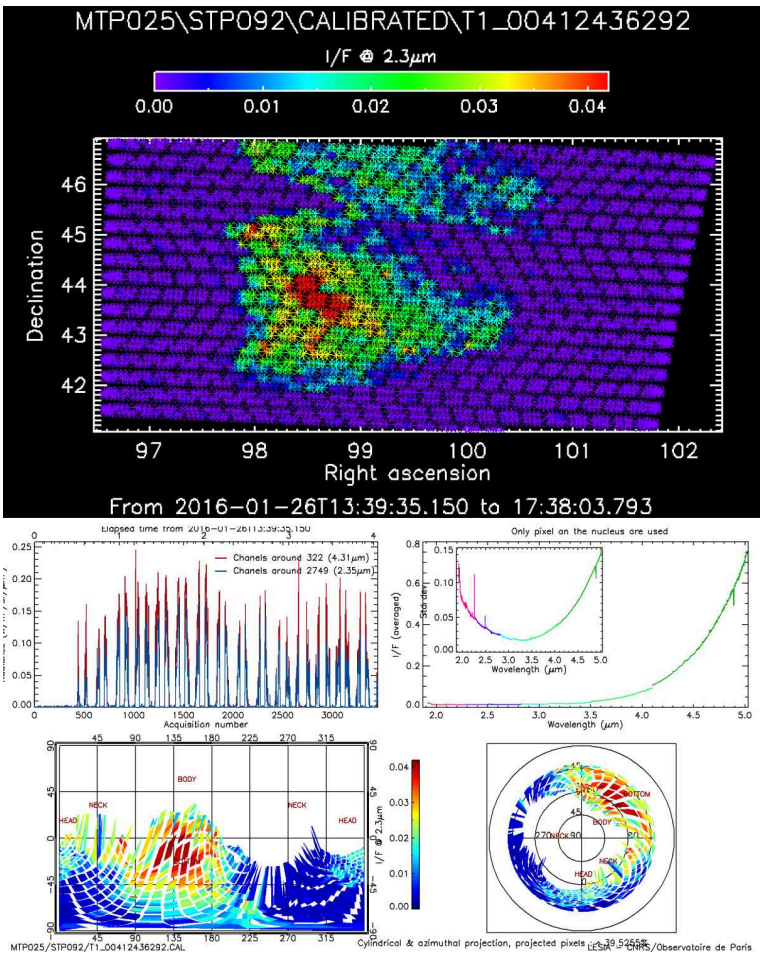


FIGURE 6.1 – Exemple de *raster* de VIRTIS-H dédié à scanner le noyau mais aussi la coma.

Avant l'étude détaillée de la température, et sachant les problèmes de calibration absolue de VIRTIS-H, il est primordial de réaliser une étude comparative avec VIRTIS-M sur des données existantes. L'enjeu principal de cette étude thermique a donc été de mettre en évidence et de caractériser l'écart relatif entre les températures calculées à partir des données VIRTIS-M et celles calculées à partir des données VIRTIS-H.

La principale difficulté consiste à comparer ces températures : il est nécessaire que la zone couverte soit identique entre les deux instruments, il faut que les conditions d'illuminations soient les mêmes, c'est à dire l'heure locale réelle, sans compter l'époque, la résolution etc... On voit alors qu'il est presque impossible de réunir ces conditions étant donné que VIRTIS-M et VIRTIS-H observent indépendamment l'un de l'autre Il existe cependant un mode d'observation dans lequel VIRTIS-M n'utilise pas son miroir pour scanner la surface. C'est uniquement dans ce cas que VIRTIS-M et VIRTIS-H observent le même champ de vue de façon synchronisé et donc que toutes les conditions évoquées précédemment sont réunies.

Ce type d'observation n'a pas été utilisé régulièrement puisque lorsque la sonde se trouve à une distance d'environ 10 km et plus, le miroir de balayage est préférablement utilisé pour couvrir une grande zone. C'est donc uniquement lors de phases où Rosetta était particulièrement proche de la comète que de telles observations ont été réalisées, lorsque ce miroir n'est pas utilisé et que le balayage se fait par

CUBES VIRTIS-M	CUBES VIRTIS-H
I1_00372832852	T1_00372826091
I1_00372834672	
I1_00372816913	
I1_00372829213	
I1_00373059512	T1_00373060091
I1_00373084712	*T1_00373085291*
I1_00373086592	
I1_00372813212	T1_00372813791
I1_00372831032	

TABLE 6.1 – Cubes VIRTIS-M acquis à courte distance du noyau de 67P en mode balayage (sans miroir scannant) et cube VIRTIS-H correspondants.

l'intermédiaire du mouvement de la sonde uniquement. Sur plus de 700 cubes du noyau par VIRTIS-M infrarouge entre MTP006 et MTP015 (correspondant à sa période d'observation de 67P), seuls 100 cubes hyperspectraux ont été acquis dans le mode où le miroir ne scanne pas. Parmi ces 100 observations seuls 9 cubes VIRTIS-M sont exploitables (distances correctes, aucun flou de mouvement...) et surtout, critère important, il existe un cube VIRTIS-H (parfois en commun entre plusieurs cubes VIRTIS-M) correspondant, permettant de réaliser une comparaison. Le tableau 6.1 donne la référence de ces cubes acquis pendant le MTP009-STP025. Ces 9 cubes VIRTIS-M et 4 VIRTIS-H ont été acquis simultanément, entre le 24 et le 28 octobre 2014 (MTP009/STP025). Les cubes utilisés dans cette étude sont indiqués en italique.

En plus de cette contrainte sur le nombre d'observations disponibles, il faut remarquer que les champs de vue de VIRTIS-M et VIRTIS-H ne sont pas exactement alignés (voir schéma du bas sur la figure 4.6). Cela signifie concrètement que lors de ces observations synchrones, l'acquisition ne se fait pas exactement au même endroit.

6.2 Modèle thermique

La modélisation des températures a été réalisée uniquement pour les données de VIRTIS-H tandis que les températures dérivées par F.Tosi de l'IAPS à Rome ont été utilisées pour les données de VIRTIS-M (la méthode est décrite dans Tosi et al. (2014)). Pour VIRTIS-H, la méthode est basée sur celle employée par Leyrat et al. (2011) lors du survol de l'astéroïde (2867) Steins par la sonde Rosetta, méthode dérivant elle-même de l'étude de Érard and Calvin (1997). Ce modèle permet d'exprimer la radiance à une longueur d'onde donnée comme étant la somme du flux solaire réfléchi par la surface et de son rayonnement thermique en tenant compte de l'émissivité (corps gris). On obtient alors :

$$L_\lambda = r_F(i,e,g)\frac{E_S}{\pi R^2} + \varepsilon(e)\,B_\lambda(T)$$

où r_F est la radiance à la longueur d'onde donnée qui dépend des angles d'observations (incidence, émergence, phase) ; $\frac{E_S}{R^2}$ est l'éclairement solaire à la distance R de l'objet observé ; ε est l'émissivité directionnelle de la surface, dépendante de l'angle d'émergence et B_λ la radiance d'un corps noir à la température T

$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1}$$

où h est la constante de Planck, c la vitesse de la lumière et k_B la constante de Boltzmann.

Pour un milieu particulaire dont les composants sont considérés comme isotropes, l'émissivité est liée à la réflectance hémisphérique à travers la loi de Kirchoff et dépend par conséquent de la longueur d'onde. La loi de Lommel-Seeliger, plus adaptée pour des surfaces sombres qu'une approche lambertienne est utilisée afin d'exprimer cette émissivité :

$$\begin{aligned}
\varepsilon(e) &= 1 - r_{hs}(e) \\
&= 1 - \int_{2\pi} r_F d\Omega_i \\
&= 1 - \frac{2 \times r_F \times (\mu + \mu_0)}{\mu_0} \left(1 - \mu \ln\left(\frac{\mu + 1}{\mu}\right)\right)
\end{aligned}$$

Le modèle consiste alors à inverser le signal afin de dériver simultanément la radiance du corps noir, l'émissivité et la température.

6.3 Résultats

L'étude ci-dessous a porté sur les cubes VIRTIS-M I1_00373084712 et VIRTIS-H T1_00373085291, acquis le 28 octobre 2014 durant le MTP009/STP025. La figure 6.2 donne les cartes du cube VIRTIS-M utilisé : réflectance à 2.3 µm, température et écart type de son estimation – ces deux dernières données ayant été calculées et fournies à l'équipe par F.Tosi. Au centre de la première carte se trouve un rectangle rouge indiquant l'empreinte du cube VIRTIS-H qui a été acquis en même temps.

6.3.1 Évaluation de l'impact du décalage des champs de vue

Ayant l'objectif de vouloir comparer les températures entre les voies instrumentales, il est important de connaître les potentielles sources de biais. Afin de comparer les températures en valeur absolue il a préalablement été évalué si le décalage des champs de vue (voir figure 4.6 page 55) avait un impact. En effet, un tel décalage peut être fatal à l'avantage que l'on tire des observations synchrones si la température sur la zone observée varie extrêmement vite, ce qui peut être le cas lorsqu'une ombre se retire ou qu'elle s'installe. De même, si la résolution est plus faible, les zones balayées par les champs de vue

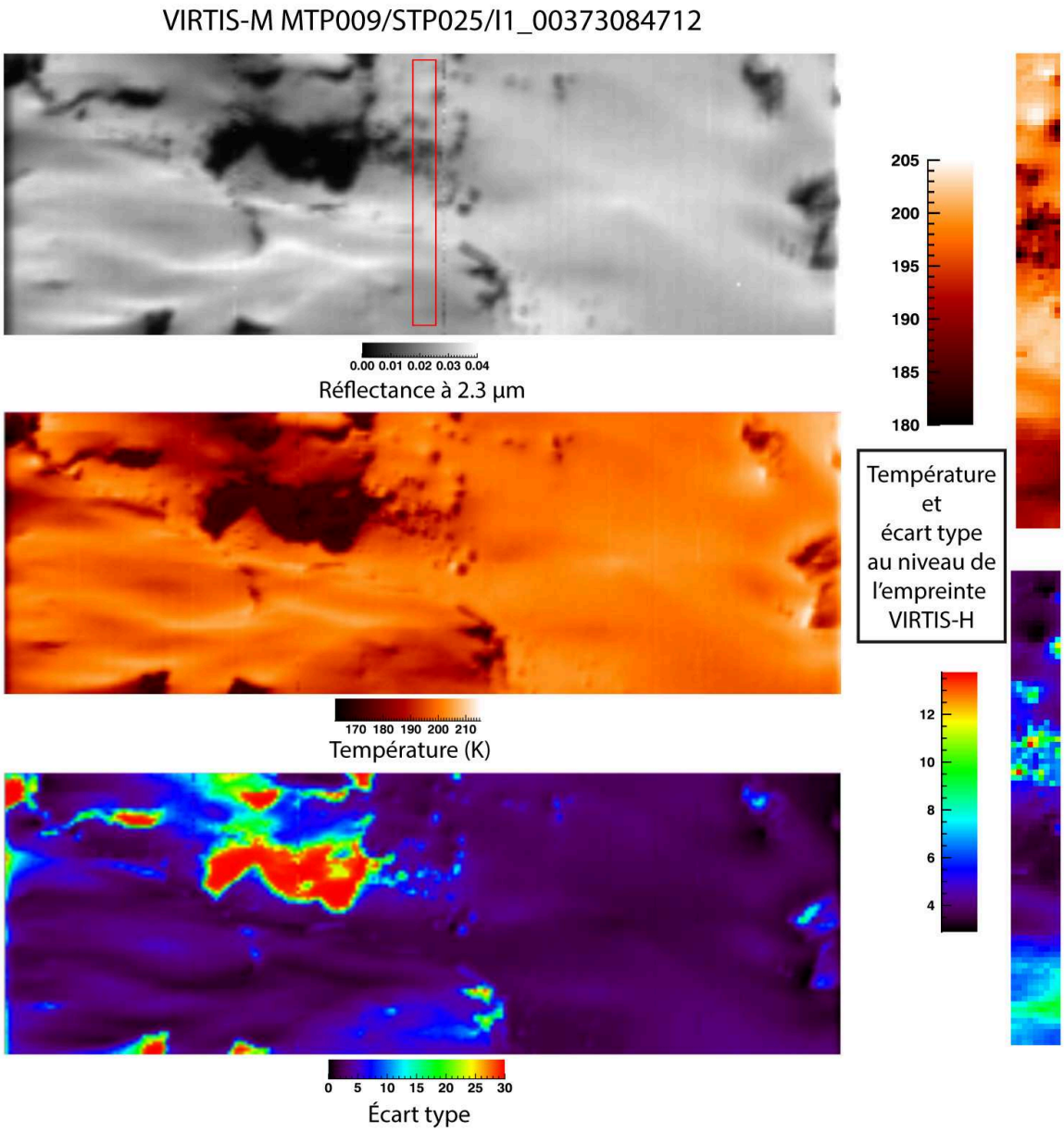


FIGURE 6.2 – Réflectance à 2.3 µm, température et erreur sur son estimation du cube VIRTIS-M. Le rectangle rouge sur la première carte correspond à l'acquisition du cube VIRTIS-H correspondant (241 pixels – non affichés – la divise). Les figures de droite représentent les données VIRTIS-M (température et écart type) sur la zone commune avec VIRTIS-H.

seront d'autant plus grandes, incluant potentiellement plus d'ombres. Cela renforcerait alors l'incertitude sur le calcul des températures et diminuerait les chances d'observer des changements sur les terrains observés.

Afin d'évaluer l'écart entre les températures lorsque l'on compare des données VIRTIS-H/VIRTIS-M sans tenir compte du décalage avec des données VIRTIS-H/VIRTIS-M prenant en compte ce décalage on a tracé dans la figure 6.3 l'écart des températures VIRTIS-M affectées ou non de ce décalage spatial :

$$\Delta T = T_{VM} - T_{VM\Delta x}$$

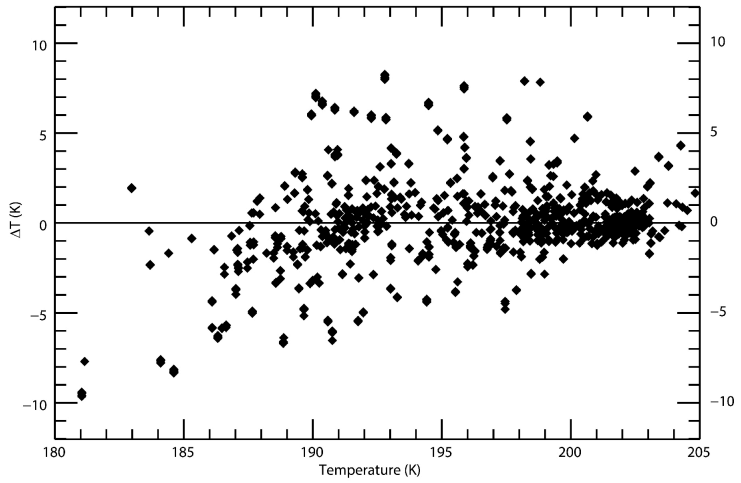


FIGURE 6.3 – Écart entre les températures VIRTIS-M normalisées par les températures VIRTIS-H avec ou sans prise en compte du décalage spatial entre les champs de vue.

où T_{VM} est la médiane des températures VIRTIS-M pour une acquisition synchrone avec VIRTIS-H mais souffrant du décalage spatial ; $T_{VM\Delta x}$ est la médiane des températures VIRTIS-M dans la trace VIRTIS-H correspondante, ce qui implique qu'elles ont été mesurées à des temps différents, si infime soient-ils, mais que le décalage des champs de vue est pris en compte.

D'après la figure 6.3 on peut voir que le décalage est le plus souvent inférieur à 2K et occasionnellement supérieur à 5K. Pour ce couple d'observations, le décalage des champs de vue n'est donc pas handicapant, les écarts constatés étant de toute façon inférieurs ou du même ordre de grandeur que l'erreur sur l'estimation de la température elle-même (voir figure 6.2, carte du bas). Leur plus grande dispersion du côté des faibles températures est également liée au fait que cette erreur est plus grande pour ces gammes de températures. Pour les raisons évoquées ci-dessus (variations de la résolution ou des conditions d'éclairement) et malgré les résultats concluants présentés ici, il est nécessaire de mener ce type d'évaluation avant toute comparaison similaire entre des dérivations de températures de chaque série de cubes VIRTIS-H et VIRTIS-M.

6.3.2 Comparaison des températures dérivées à partir de VIRTIS-M et de VIRTIS-H

La figure 6.4 donne la comparaison entre les températures dérivées de VIRTIS-H et celles dérivées de VIRTIS-M le long de l'acquisition de VIRTIS-H (voir rectangle rouge figure 6.2). Il est préférable de comparer les températures VIRTIS-H avec la courbe rouge (figure 6.4), exprimant l'estimation maximale des températures VIRTIS-M. La différence, représentée par la courbe en pointillés noirs (également figure 6.4) donne un écart moyen de 8K entre les deux estimations. On peut noter d'une part que les tendances sont reproduites dans les deux cas entre VIRTIS-M et VIRTIS-H, ne conduisant à des comportements erratiques que ponctuellement ; d'autre part l'écart constaté est probablement dû à la différence de niveau des données, les données VIRTIS-H donnant un niveau de signal plus important que celles de VIRTIS-M, tendance que l'on retrouve ici.

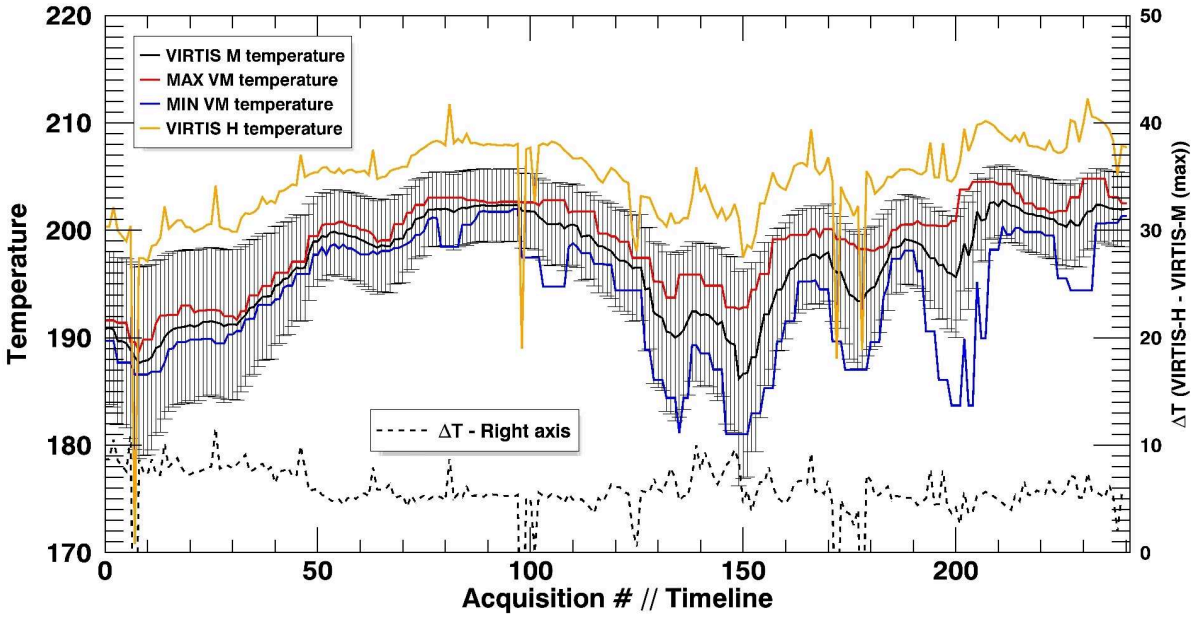


FIGURE 6.4 – Comparaison des températures entre les observations VIRTIS-M et VIRTIS-H.

Conclusion et perspectives

Dans l'étude photométrique de la surface de 67P (chapitre 5), j'ai dans un premier temps utilisé le jeu de données très fourni de VIRTIS pour réaliser une étude à l'échelle globale. L'importance d'avoir un bon échantillonnage de la courbe de phase couplé au fait que l'activité de la comète est susceptible de modifier les propriétés de la surface contraint à se restreindre à une période de temps limitée. Cette période s'étend sur les premiers mois de la mission, d'août 2014 à janvier 2015, pour une couverture complète de l'hémisphère Nord s'agissant de VIRTIS-M. Cela a permis de déterminer les paramètres photométriques de la surface : albédo de diffusion simple, paramètre d'asymétrie, fraction de rétrodiffusion et rugosité macroscopique. Les résultats indiquent que la surface de l'hémisphère Nord de 67P présente des variations modérées de ces propriétés spectrales et photométriques (albédo de diffusion simple et pente spectrale) à grande échelle spatiale.

Le but de cette étude était de déterminer les caractéristiques photométriques de la surface de 67P tout en comparant les modèles de Lommel-Seeliger et une version simplifiée du modèle de Hapke couplés à une version à un ou deux lobes de la fonction de Henyey-Greenstein. L'idée étant de tester si l'un d'eux est plus apte à décrire les propriétés de la surface. Parallèlement, j'ai aussi comparé les résultats obtenus avec les deux voies de VIRTIS. Bien que le nombre d'observations soit très important, la gamme d'angles de phase reste limitée. Or, déterminer des paramètres comme la fraction de rétrodiffusion ou la rugosité macroscopique nécessite des angles de phase élevés. Ici, le jeu de données ne nous permet pas d'aller au-delà de 110° et une partie de l'information permettant de calculer avec précision ces deux paramètres peut être contenue dans des données dont les phases seraient plus importantes. Dans cette situation, le modèle de Lommel-Seeliger avec une fonction de phase à un lobe est préférable afin de ne pas introduire de biais dans les calculs.

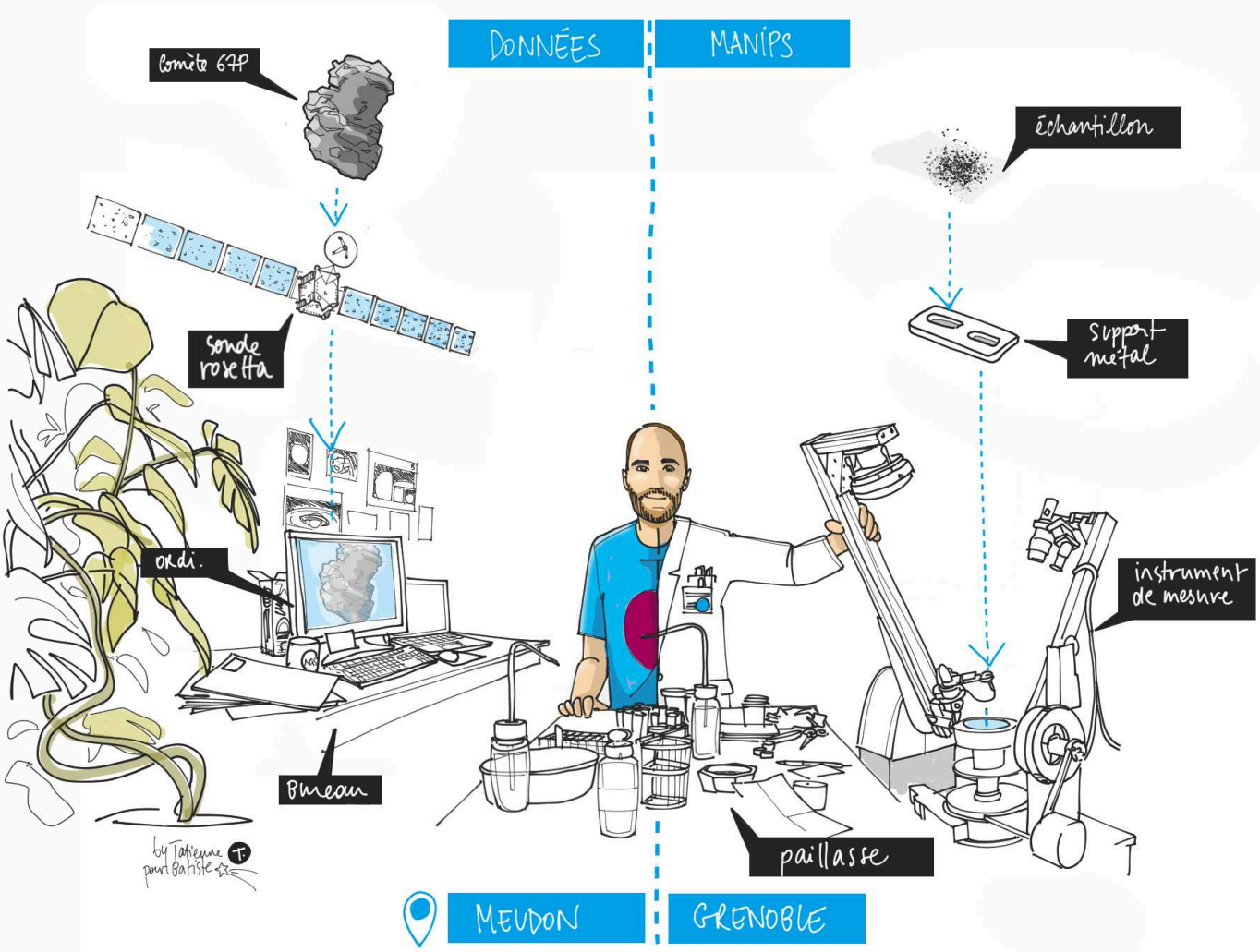
Une étude à l'échelle globale intègre de nombreuse observations et sur une surface importante, regroupant ainsi différents types de terrains. J'ai donc réalisé la même étude mais à l'échelle locale sur des terrains à la morphologie différente afin d'étudier son impact sur la détermination des paramètres photométriques. La région d'Imhotep se prête particulièrement bien à cela et j'ai sélectionné des terrains lisses et des terrains irréguliers qui sont deux morphologies que l'on retrouve régulièrement à la surface de 67P. J'ai montré qu'à ces deux types de terrains correspondent des paramètres photométriques différents, et ce à partir d'un jeu de données équivalent en géométrie d'observations et couvrant la même période, éliminant ainsi les autres biais possibles. Cela signifie bien qu'une étude globale ne

donne qu'une idée approximative des paramètres photométriques de la surface. En l'occurrence, on a montré que l'hémisphère Nord présente dans sa globalité le même albédo de diffusion simple que les terrains accidentés d'Imhotep. Pour autant, on trouve sur cet hémisphère de nombreuses zones couvertes de poussières. Cela indique que les observations à l'échelle globale pourraient être influencées majoritairement par des terrains accidentés du même type que ceux identifiés sur Imhotep. Pour confirmer cette dernière hypothèse, de nouvelles études doivent être conduite sur des terrains différents, à la fois sur l'hémisphère Nord mais aussi sur l'hémisphère Sud. Il est alors nécessaire de localiser des zones observées avec des géométries d'observations variées pour pouvoir construire une courbe de phase suffisamment complète mais pour lesquelles la couverture temporelle reste peu étendue pour limiter les biais liés à l'activité et aux changements qu'elle implique à la surface (Filacchione et al., 2016a; Fornasier et al., 2016; Ciarniello et al., 2016). Réaliser une étude locale a permis de discriminer la photométrie de deux types de terrains aux morphologies différentes et courant à la surface de 67P. Dès lors, pour compléter un tel travail, il serait intéressant de mener des études comparatives avec la caméra OSIRIS qui dispose d'un jeu de filtres permettant de faire de la spectrophotométrie dans le visible.

Concernant l'étude thermique (chapitre 6), j'ai montré que le décalage très faible existant entre les champs de vue de VIRTIS-H et VIRTIS-M n'influe pas lorsque l'on compare les températures dérivées à partir des données de ces deux voies instrumentales. Ce résultat est généralisable au premier ordre à l'ensemble des 9 cubes indiqués dans le tableau 6.1 car ils ont été acquis simultanément, dans une configuration similaire (proche du nadir) et parce que la résolution est la même. Cependant dans des cas où les variations de températures sont importantes – si une zone sort ou rentre dans l'ombre au moment de la mesure par exemple – ou si la résolution est plus faible (ce qui rendrait les dérivations de la température plus sensibles aux ombres présentes dans le champ de vue) il faut s'attendre à voir une dispersion plus importante et donc une correspondance moins bonne entre VIRTIS-M et VIRTIS-H.

Dans un deuxième temps, j'ai mis en évidence que les températures déterminées à partir des données VIRTIS-H sont supérieures d'environ 8K par rapport aux températures déterminées avec les données VIRTIS-M et pour ces gammes de températures. Il est possible qu'une partie de cet écart proviennent de la méthode employée qui n'est pas exactement la même pour VIRTIS-H et VIRTIS-M (voir section 6.2 pour VIRTIS-H et voir Tosi et al. (2014) pour VIRTIS-M). Cependant, une grande majorité des différences provient du fait que VIRTIS-H n'est pas calibré en absolu et qu'il mesure par conséquent un flux surestimé par rapport à VIRTIS-M comme souligné dans la section 4.2.3 page 59.

Les études photométriques et thermiques que j'ai menées dans cette partie m'ont permis d'étudier les propriétés de la surface de 67P comme cela vient d'être résumé. C'est aussi la première fois que de telles études s'attachent à une comparaison entre les deux voies de l'instrument VIRTIS : VIRTIS-M et VIRTIS-H. Dans l'avenir, cela permettra d'améliorer la calibration de VIRTIS-H et d'exploiter pleinement son jeu de données.


DONNÉES
MANIPS
Comète 67P
échantillon
sonde rosetta
support métal
ordi.
instrument de mesure
Bureau
paillasse
by Tatienne pour Bahiste
MEUDON
GRENOBLE

Troisième partie

Approche expérimentale pour l'étude de la composition de 67P/CG : analyse de poudres ultra-fines comme analogue de surfaces cométaires

Introduction

Force est de constater que le retour d'échantillons provenant de surfaces de corps du système solaire est rare et pour le moins ardue. Les missions spatiales nous renseignent ainsi le plus souvent à distance grâce à des sondes sur la composition de ces surfaces. En larguant un atterrisseur, ou « astromobile » (terme auquel on préfèrera, malgré l'anglicisme, celui de « rover » !), il devient possible d'analyser in situ des échantillons choisis et prélevés avec soin. Mais les contraintes du voyage spatial impliquent un compromis sur les capacités des instruments embarqués. Ces derniers n'ont pas le degré de précision des instruments élaborés au chaud dans nos laboratoires. Ces derniers bénéficiant qui plus est de l'expertise humaine et ce, au quotidien. Enfin, les procédures automatiques de retour d'échantillons de surface ne se développent que depuis récemment avec des missions comme Hayabusa 1 et 2 ou OSIRIS-Rex vers des astéroïdes, Phobos-Grunt (RIP) pour un des satellites de Mars, ainsi que Chang'e 5 pour des échantillons lunaires. Alors qu'il ne faudra pas compter sur un échantillon martien avec 2030 (c'est mon pronostic) j'aurai également tendance à penser qu'il faudra attendre plus longtemps avant de voir un morceau de comète dans nos laboratoires. Les difficultés qu'a connu Philae lors de son atterrissage ont montré qu'une telle manœuvre est pour le moins délicate. Outre cette première étape, la suivante est de forer (bien que prévu pour Philae, cela n'a jamais été réalisé) puis de conserver l'échantillon à des températures extrêmement basses afin d'empêcher la sublimation des glaces qu'il contient. Enfin, il faudra que la capsule de retour traverse l'atmosphère ou concevoir un système qui la satellise avant d'être attrapé en orbite. Nous n'y sommes donc pas encore.

Revenons les pieds sur Terre. Pour palier à la rareté de ces précieuses roches extraterrestres, et pour aider à l'interprétation de l'immense collection de données acquises en télédétection par les sondes spatiales, il est intéressant d'essayer de reproduire les caractéristiques spectrales des objets observées grâce à des analogues « élaborés de toute pièces », la plupart du temps avec des matériaux terrestres. Cette technique est relativement répandue et de nombreuses équipes de recherche sont équipées d'instruments permettant de reproduire les mêmes conditions de mesures que les instruments en vol (gamme spectrale, géométrie d'observation, cellule à pression et température ajustables...).

Les expériences cherchant à expliquer les processus liés à la physique cométaire se sont majoritairement concentrées sur les glaces. Sur le comportement de la glace d'eau pure ou en mélange avec d'autres glaces (CO_2, CO, CH_4, NH_3) et en étudiant leurs évolutions selon la température et/ou éventuellement à faible pression (Schmitt et al., 1989; Ibadinov, 1989). Sur le piégeage d'espèces volatiles dans les

glaces (Bar-Nun et al., 1985). Sur les clathrates de méthane ou de neige d'eau à faible pression et basse température Delsemme and Wenger (1970) ou encore sur la dynamique de la sublimation et la structure de la glace lors de sa sublimation (Morozhenko et al., 1986).

Dans les années 70, des expériences ont également porté sur l'évolution de mélanges de glaces avec différents types de matériaux. Notamment à l'Institut Ioffe de Saint-Pétersbourg et à l'Institut d'Astrophysique de Douchanbé (Duschambe, actuelle capitale du Tadjikistan et anciennement rattachée à l'URSS) où les groupes de travail de Kajmakov and Sharkov (1972) et Dobrovolsky and Kajmakov (1977) ont étudié des suspensions glacées d'eau mélangée à des électrolytes ou des particules métalliques, de SiO_2 ou de Al_2O_3. De l'autre côté de l'Atlantique c'est au Jet Propulsion Laboratory (JPL) de Pasadena que les recherches portent sur des expériences pouvant s'appliquer aux problématiques cométaires ou même à celles des calottes martiennes. Ainsi, Saunders et al. (1986), Storrs et al. (1988) et Sutton (1986) réalisent des expériences dans lesquelles une suspension de glace d'eau et de phyllosilicate (puis par la suite de matériaux organiques) est pulvérisée dans de l'azote afin de la geler instantanément. Le résidu de sublimation filamenteux et très poreux qui est observé est du même type que celui observé dans les études conduites actuellement par Antoine Pommerol et Olivier Poch au laboratoire LOSSy de l'Université de Bern (Pommerol et al., 2015; Poch et al., 2016b). Stephens and Gustafson (1991) ont également étudié la réflectance de mélanges du même type.

Cette revue ne se veut pas exhaustive, il est cependant impossible de faire l'impasse sur la série d'expériences allemandes KOSI (*Kometensimulation*) de Grün et ses collaborateurs (Grün et al., 1991). Ces 11 expériences de simulations cométaires ont été développées au DLR de Cologne entre 1986 et 1993. Ce faisant, elles ont bénéficié des avancées réalisées grâce à la rencontre entre une flottille de sondes spatiales (Giotto, Véga 1 & 2, Suisei et Sakigake) et la comète 1P/Halley, ce qui n'était pas le cas de la plupart des travaux évoqués précédemment. A l'époque, le changement de paradigme dans la conception que les scientifiques avaient des noyaux cométaires a été important. Le passage à la vision d'une « boule de neige sale » (*dirty snowball*) initialement développé par Fred Whipple (Whipple, 1950, 1951, 1955) a bifurqué vers celle de la « boule de poussières glacée » (*icy dustball* ou *dirtball*). Ce changement s'est notamment accompagné d'une meilleure connaissance de la composition des noyaux cométaires, tout au moins celui de Halley. L'importance des phases réfractaires avait été ainsi sous-estimée par le passé. Celle-ci n'est que renforcée par la quasi-absence de glace constatée sur la surface des noyaux cométaires visités par la suite.

Les expériences KOSI se développent dans le but de reproduire la physique régissant l'activité du noyau. Pour cela, une cuve remplie par un mélange de glace d'eau et de dioxyde de carbone mélangées à des particules de minéraux ($< 5\mu m$) et de carbone (23nm) est placée dans une chambre refroidie à 77K et à faible pression (10^{-6}mbar) (Grün et al., 1991). Dix lampes au xénon reproduisant à peu près le spectre solaire dans le visible et fournissant l'équivalent de $1,25$ constante solaire (Sears et al., 1999) permettent d'engendrer la sublimation des glaces. Des capteurs vidéo, de pressions, de températures, des jauges d'ionisation, des collecteurs de poussières (voir la figure 6.5) ou encore un spectromètre de masse mesurant la composition, le flux et la vitesse des gaz sublimés sont installés et permettent un suivi complet des expériences. Avant et après l'illumination, des mesures en réflectance sont réalisées dans le visible et l'infrarouge de même que des mesures de porosité et de résistance mécanique. Enfin,

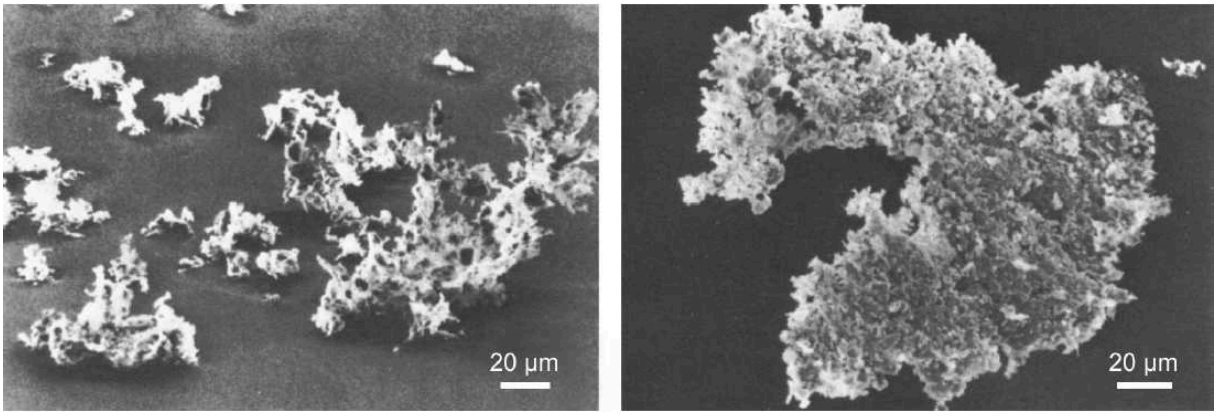


FIGURE 6.5 – Images au microscope électronique à balayage de grains de poussières émis pendant l'expérience KOSI-3.

des mesures chimiques, isotopiques et pétrographiques sont faites sur des échantillons prélevés avant et après l'illumination. Plusieurs paramètres varieront au cours des 11 expériences KOSI : l'intensité de la lumière incidente, la composition du mélange, l'ajout d'instruments...

L'important travail expérimental mené grâce aux expériences KOSI ne peut être résumé entièrement ici, le lecteur est donc dirigé vers la revue très complète de Sears et al. (1999). KOSI a permis des avancées importantes dans la compréhension des processus physiques liés à l'activité cométaire : formation d'un manteau de poussières, mise en place d'une stratigraphie (selon la nature des glaces, du matériau, de l'illumination), mécanismes d'éjection de la poussière, rapport gaz/poussière éjectées... Nombreuses restent les questions en suspens après cette séries de manipulations et nombreux également peuvent être les biais (préparation d'échantillons influant sur la nature de la couche superficielle, échelle, gravité, condition initiale de mélange, gradient de pression ou de température, insolation...). Cependant, KOSI fût un projet extrêmement ambitieux qui, malgré sa complexité, a permis de forger un socle de connaissances dans cette discipline difficile qu'est la reproduction des processus cométaires. La communauté scientifique a énormément gagné de ces expériences. Des groupes de travail comme ceux de l'Université de Bern, de Tel-Aviv, de Grenoble, du JPL continuent aujourd'hui à mettre en place des expériences liées à la thématique, mais souvent sur des problématiques plus ciblées.

Problématique

L'instrument VIRTIS nous renvoie de la comète 67P une surface globalement homogène d'un point de vue spectral. Contrairement à des surfaces planétaires comme celle de Mars ou Pluton par exemple, la variabilité y est clairement moindre. Le spectre VIRTIS « typique » présente deux pentes spectrales rouges, dans le visible et l'infrarouge, ainsi qu'une bande d'absorption large et complexe centrée sur 3.2 µm. Hormis sur des zones plus riches en glace ($< 5\%$) (Barucci et al., 2016; Filacchione et al., 2016b,c), cette bande spectrale est la seule signature visible sur l'ensemble de la surface. Cette étude n'a pas pour but de déterminer l'origine de la bande d'absorption à 3.2 µm. L'étude des composés organiques responsables d'une telle signature repose sur la caractérisation chimique de nombreuses espèces et est actuellement en cours (E. Quirico et I. Istiqomah à l'IPAG, L.V. Moroz au DLR).

Mais le spectre de 67P ne renferme pas ce seul mystère. Comment expliquer par exemple le faible albédo de la surface, d'environ 6% à 0.55 µm Ciarniello et al. (2015) ? Comment expliquer les pentes spectrales, qui varient assez peu spatialement ? Les réponses à ces questions ne sont pas si évidentes car faire le lien entre un matériau et un albédo ou une pente spectrale est bien plus difficile que de le faire pour une bande d'absorption. Cette dernière est liée à une liaison chimique, une molécule ou est caractéristique de la présence d'un ion dans un minéral par exemple. Elle varie peu ou selon des contraintes précises et souvent connues. L'albédo, tout comme la pente spectrale, ne sont pas caractéristiques d'un seul matériau. Ils peuvent dépendre de son état (taille des grains, altération, texture, température) ou des conditions sous lesquelles il est observé (géométrie d'observation). Un matériau pourra donc exprimer une large gamme d'albédos et de pentes spectrales et partager certaines de ces caractéristiques avec un autre matériau, rendant difficile l'interprétation des données de télédétection et l'identification de la composition d'une surface.

Trois paramètres sont très influents sur les spectres et contrôlables en laboratoire. Il s'agit de la **composition**, de la **taille des grains** et de la **texture** (compacité, orientation des grains). Ces paramètres sont donc à prendre en compte pour essayer de reproduire le spectre de 67P tel qu'observé par VIRTIS. Ils influent directement sur le spectre et ont l'avantage d'être contrôlables. De nombreuses études permettent de ne pas « partir de zéro ».

Concernant la taille des particules, les instruments comme GIADA, COSIMA et MIDAS (à bord de Rosetta), les précédents survols de comètes, le retour d'échantillons de Stardust ou encore l'analyse des poussières interplanétaires (IDPs, UCAMMs...) donnent des contraintes sur la taille et éventuellement la composition des poussières cométaires (voir 2.3 et 7.4.1). La plupart de ces observations, qu'elles soient indirectes ou réalisées dans la coma, indiquent que ces grains cométaires balaient des tailles allant de quelques centaines de micromètres à l'échelle inférieure au micromètre. Un des premiers objectifs est donc d'essayer de s'approcher au mieux de ces tailles. Notamment, un accent est mis ici sur les plus petites tailles de grains que l'on soupçonne d'affecter fortement l'albédo.

Du côté de la composition, le choix de bons analogues est primordial. Un des défis est notamment de choisir des matériaux capables d'engendrer un très faible niveau de réflectance dans l'infrarouge. Tandis qu'il est plus simple d'expliquer ou de trouver des matériaux sombres dans le domaine du visible, ceci est moins trivial dans le domaine de l'infrarouge. D'où l'importance de choisir les matériaux adaptés, capables d'amener à cette propriété particulière. Concernant la matière organique, les tholins sont parfois utilisés comme analogues, y compris pour les comètes. Mais ils ne sont pas toujours bien caractérisés et leur complexité ajoute une imprécision au résultat final. Cette étude cherche en effet à contrôler au mieux les matériaux initialement utilisés afin d'identifier quel rôle chacun aura sur le résultat. Dans la sous-section 7.3 on s'attachera ainsi à détailler chaque composé qui a été sélectionné et testé en précisant leurs caractéristiques et la raison de leur choix.

La texture des échantillons, et des surfaces planétaires de manière générale, est un paramètre important. Un même matériau, fait des mêmes tailles de grains, aura un albédo plus ou moins important selon sa compacité. Cette compacité, qui renvoie à la proximité des grains au sein même de l'échantillon, est un facteur important à ne pas négliger. Nous aborderons ces questions au cours de la discussion dans la section 9.

Chapitre 7

Protocole expérimental et échantillons

Les différentes étapes de cette étude ont été effectuées à l'IPAG, l'Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble. Tous les moyens instrumentaux, ainsi que l'expertise humaine, y sont disponibles si nécessaire, facilitant grandement les différentes étapes de ces expériences, de la préparation des échantillons à leur mesure.

7.1 Dispositif et protocole expérimental pour les mesures de réflectance

7.1.1 Généralités sur le spectro-gonio-radiomètre

Les mesures de réflectances ont été effectuées grâce au spectro-gonio-radiomètre de l'IPAG (figure 7.1), par ailleurs disponible à la communauté. Cet instrument de fabrication maison permet d'obtenir des spectres en réflexion, que ce soit pour des glaces, neiges (H_2O, CO_2) ou des matériaux divers, compactés ou en poudres, grains... Nous ne détaillerons pas ici le fonctionnement de l'instrument dans le cadre spécifique de l'étude des glaces grâce à diverses « options » (cellules SERAC et Carbon-IR), le lecteur est pour cela renvoyé vers les travaux de Pommerol (2009) ainsi que vers le descriptif technique disponible sur le site internet dédié, Cold Surfaces Spectroscopy. De même, il est possible de trouver un descriptif complet du dispositif dans Brissaud et al. (2004) ainsi que dans les travaux de thèses de Bonnefoy (2001). Cependant, un descriptif de l'instrument s'avère indispensable pour détailler la configuration utilisée pour nos mesures. C'est ce qui sera fait dans les lignes suivantes.

Le spectro-gonio-radiomètre possède deux capteurs capables de couvrir un large spectre allant du visible (0.35µm) au proche infrarouge (4.8µm). Le premier capteur, au silicium, est dédié au visible, allant de 0.35µm à 1.0µm. Le deuxième capteur, au InSb, est quant à lui dédié au proche infrarouge, soit de 1.0 µm à 5.0 µm environ. Le rapport signal sur bruit étant moindre sur les « bords » de la gamme spectrale comme c'est souvent le cas, on préfère restreindre les acquisitions, ici entre 0.4µm et 4.0µm. Enfin, l'échantillonnage choisi a été de 20 nm pour toutes les mesures, ce qui est amplement suffisant dans cette

étude ne visant pas à résoudre des bandes d'absorptions fines et malgré que cette valeur soit supérieure à celle de VIRTIS. Cela fixe le temps d'acquisition d'un spectre à environ 45 min.

Un autre avantage du spectro-gonio-radiomètre est son côté « gonio ». Les deux bras visibles sur la figure 7.1, portant les capteurs et le miroir, sont en effet articulés, tout comme la plate-forme les soutenant. Ainsi est-il possible de faire varier l'incidence de 0° à 85°, l'émergence de 0° à 80° et l'azimuth de 0° à 180°. Cela permet de balayer un grand nombre de configurations angulaires, notamment de phase, celles-ci variant ainsi de 4° au minimum (8° pour les échantillons clairs type glace) à 165° maximum. L'étude du pic d'opposition, un des points intéressants en photométrie, n'est en revanche pas possible en raison des phases accessibles d'après la conception de l'appareil. Les bras se gênant mutuellement dans une configuration approchant l'alignement vertical, soit 0° en phase. La précision sur les angles est élevée : 0.1° pour l'angle d'incidence et 2° pour l'émergence et l'azimuth. De plus, la variation de ces angles peut être contrôlée précisément avec un échantillonnage de 0.1°.

Le dernier atout de l'instrument est sa précision photométrique. Une grande attention a été portée concernant cet aspect lors de la conception de l'instrument mais également lors de l'établissement des procédures de calibration des données, que ce soit dès les premières étapes de conception (Bonnefoy, 2001; Brissaud et al., 2004) mais aussi plus tard via de nouvelles améliorations (Pommerol, 2009). Il en résulte donc une très grande précision, atteignant en absolu les 1% de 0.35µm à 2.5µm puis 2% jusqu'à 5µm. De 0.5µm à 2.5µm, celle-ci est meilleure que 0.5% en relatif.

7.1.2 Du spectro-gonio-radiomètre au micro spectro-gonio-radiomètre

Le spectro-gonio-radiomètre tel qu'il est décrit ici a été conçu pour la mesure d'échantillons clairs, très réfléchissant la plupart du temps – typiquement des glaces ou de la neige. Ainsi apparait la nécessité de simuler une zone illuminée plus grande que celle mesurée afin de pouvoir étudier la diffusion à travers des milieux souvent translucides. Combiné à des contraintes techniques relatives à la précision et aux angles de mesures souhaités, le concept final retenu repose donc sur l'acquisition, par les détecteurs, du signal provenant d'une zone circulaire de 2 cm de diamètre pour une surface éclairée d'environ 20 cm de diamètre, elle-aussi circulaire (voir figure 7.2a et Brissaud et al., 2004). On notera que l'échantillon n'est pas éclairé directement par une fibre optique mais qu'un miroir permet d'y rediriger la lumière qui parvient de cette fibre. Bien que, dans cette configuration, la totalité des photons « envoyés » ne sont pas inclus dans la zone mesurée, l'échantillon est suffisamment clair et le signal récupéré par les détecteurs est assez important, donc le rapport signal sur bruit est suffisamment élevé. Dans cette étude où l'on travaille avec des échantillons très sombres, une telle configuration n'est pas optimale, avec pour résultat une perte en précision et en efficacité dans la mesure. Dans le cadre d'un projet de développement d'un nouvel instrument de ce type, l'utilisation d'un prototype, grandement basé sur la structure existante, a donc été utilisé.

Ce nouvel appareil, le micro spectro-gonio-radiomètre (ou « gognito » de son petit nom) est le prototype permettant de valider le concept d'un futur instrument. Ce prototype ayant été en l'occurrence conçu pour être utilisé avec la structure existante du spectro-gonio-radiomètre classique, décrite précédemment. Ici, les angles d'observations balayés ainsi que la gamme spectrale mesurée ne vont donc pas changer. La

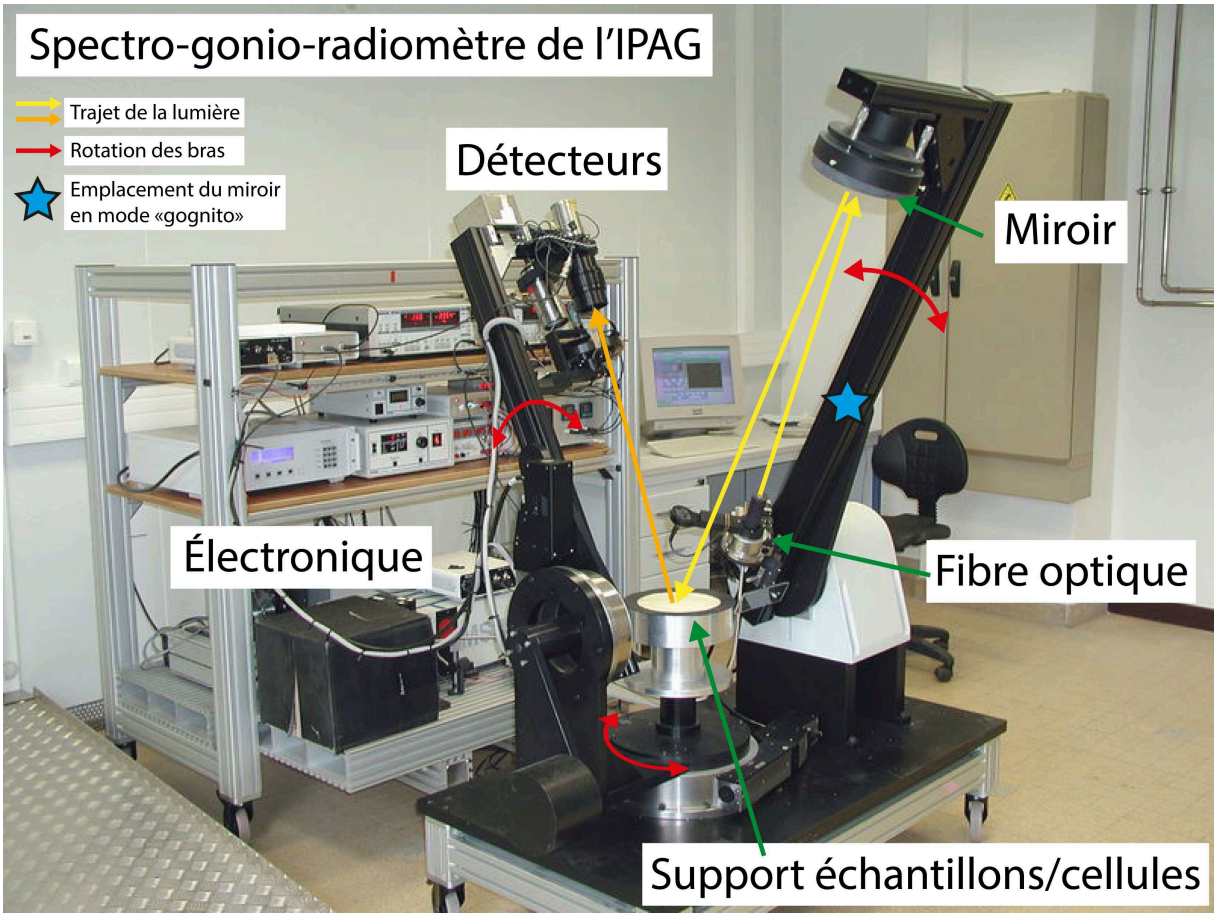
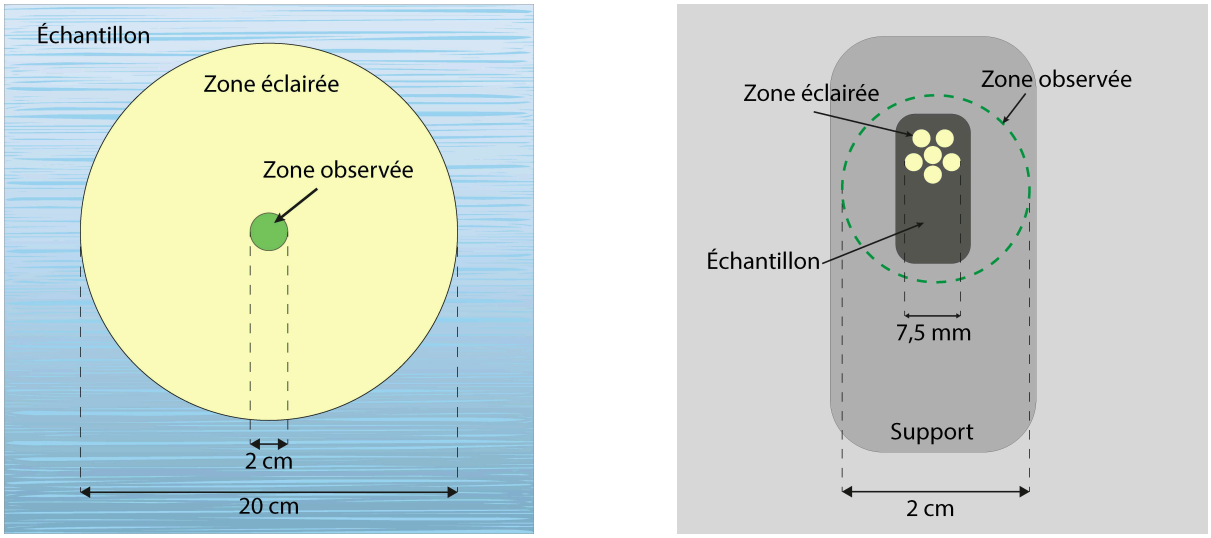


FIGURE 7.1 – Le spectro-gonio-radiomètre de l'IPAG. Les traits jaunes et oranges représentent le trajet de la lumière : sortant de la fibre optique, se réfléchissant sur le miroir puis illuminant l'échantillon (jaunes). Une partie (orange) pénètrera dans les capteurs qui sont utilisés successivement.

différence entre ces deux concepts réside principalement dans la façon d'éclairer l'échantillon. Dans le cas du spectro-gonio-radiomètre la surface éclairée est de 20 cm de diamètre (figure 7.2a). S'agissant de micro spectro-gonio-radiomètre cette zone est en forme de fleur d'environ 7.5 mm de diamètre (figure 7.2b). Pour arriver à cette fin, un autre miroir a notamment été utilisé, plus proche de l'échantillon mais placé sur le même bras articulé faisant varier l'incidence. Cette conception est nécessaire étant donné la nature des échantillons mesurés, très absorbants, et n'existant qu'en faible quantité. La zone d'observation des détecteurs ne variant pas (2 cm) nous passons d'un cas où seule une petite partie de l'énergie incidente, qui est connue, est observée (et non mesurée !) à un cas où la totalité de celle-ci est observée. Le rapport signal sur bruit est alors meilleur puisque dans ce deuxième cas il est possible de savoir exactement ce qui est absorbé (sachant ce que l'on envoie). Les figures 7.3 et 7.4 illustrent la capacité à mesurer des échantillons sombres ainsi que le gain obtenu en précision en passant à une configuration de type « gognito ».



(a) Mode « gonio »

(b) Mode « gognito »

FIGURE 7.2 – Principes de mesures pour chaque mode de l'instrument. Dans les deux cas l'illumination et la mesure se font au nadir, à angle de phase théorique nul (inatteignable en pratique avec cet instrument). Dans les deux cas, la zone de mesure est un disque de 2 cm de diamètre. En mode gognio, la zone éclairée est un disque de 20 cm tandis qu'en mode gognito, la zone éclairée est une fleur de 7.5 mm de diamètre. Le porte échantillon est bien plus petit dans ce mode (zone gris sombre) et est rempli avec environ 1 g de matière dans le cadre de cette étude.

7.1.3 Protocole de mesure

Le protocole utilisé consiste à observer l'échantillon dans une seule configuration géométrique et à mesurer son spectre. C'est donc une technique de spectroscopie classique qui permet ensuite d'étudier notamment les propriétés absorbantes et la composition du matériau. Toutes les mesures réalisées et présentées sont de ce type. Elles ont été faites avec un angle d'incidence de 0° et un angle d'émergence de 30°. Cette configuration est tout à fait classique dans les expériences comme celle-là. Selon les instruments on trouve parfois dans la littérature des mesures faites à incidence et émergence de 20° dans le plan principal.

La procédure pour la mesure des échantillons est la suivante. La première chose à faire est de mesurer les surfaces lambertiennes de référence : ces plaques sont conçues pour réfléchir la lumière à environ 95% et ce de manière homogène, parfaitement diffuse. Il n'y a donc aucun reflet spéculaire par exemple. Ces deux plaques sont le Spectralon© (*Labsphere Inc.*) dédié à la gamme visible (0.25 µm à 2.5 µm) et l'Infragold© (*Labsphere Inc.*) dédiée à la gamme infrarouge (de 0.7 µm à 20 µm). Leur utilité sera expliquée dans la partie 7.1.4 traitant de la calibration des données. Vient ensuite la mesure de l'échantillon en lui-même : après sa préparation dans le support (figure 7.2b) il suffit de placer ce dernier à l'endroit où la lumière incidente arrive et à la hauteur prévue à cet effet, fixée avec précision. Une petite cale est disponible et un repère a été fixé dessus pour faciliter le placement du support. Le lancement de l'acquisition se fait via une interface Labview classique où il est possible de choisir la gamme spectrale balayée, les angles d'incidence, d'émergence, d'azimut et de rentrer des métadonnées par exemple.

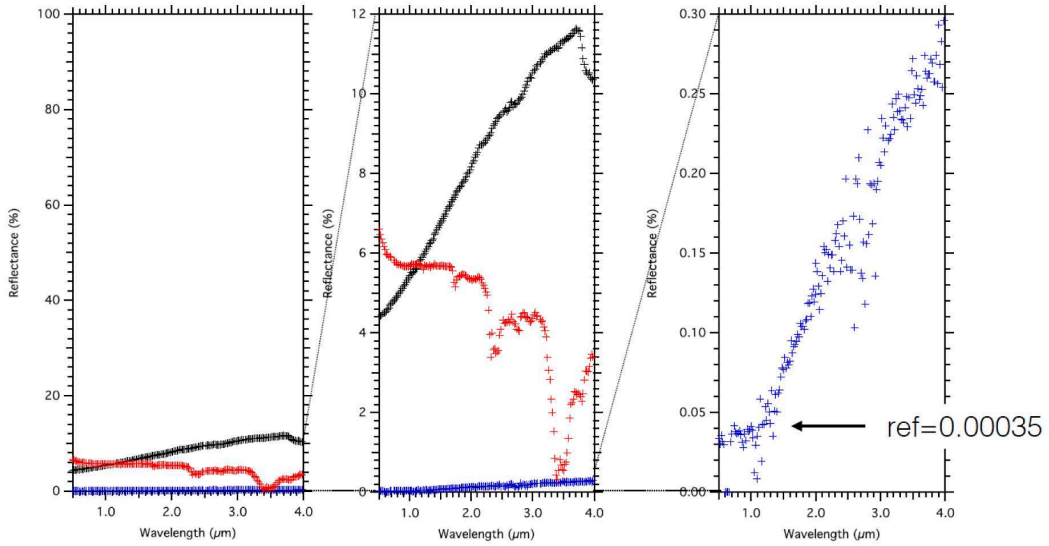


FIGURE 7.3 – Mesures de différentes surfaces Lambertiennes extrêmement absorbantes entre 0.5 µm et 4.0 µm. En noir : Spectralon à 5% ; en rouge : Black MetalVelvet ; en bleu VANTABLACK. Réalisées avec le micro spectro-gonio-radiomètre (« Gognito »), ces mesures montrent sa capacité à opérer avec des matériaux extrêmement absorbant. Source : Pierre Beck, communication personnelle.

7.1.4 Grandeur physique mesurée et calibration des données

La grandeur physique utilisée pour de nombreuses expériences de laboratoire comme celle-ci est le *REFF*, pour *Reflectance Factor*. Elle est obtenue en faisant le rapport entre la mesure de réflectance de l'échantillon et celle d'une référence parfaitement diffuse (Hapke, 2012). Dans l'absolu, les procédures de calibrations entre les modes « gonio » et « gognito » ne sont pas très différentes les unes des autres. Initialement développées par Nicolas Bonnefoy durant sa thèse (Bonnefoy, 2001), ces procédures ont été améliorées et un logiciel facilitant leur application aux données, « Goniosoft », a été développé par Antoine Pommerol quelques années plus tard, également pendant sa thèse (Pommerol, 2009). Nous ne détaillerons pas ici les procédures d'étalonnage et de calibration et le lecteur est renvoyé vers ces deux documents très complets ainsi que vers la documentation du logiciel disponible sur demande.

En revanche, il est important de noter que le logiciel Goniosoft n'a pas été conçu pour l'utilisation de l'instrument dans son mode « gognito ». C'est à dire avec une zone d'éclairement plus petite que la zone de la mesure et non l'inverse comme c'est le cas en mode gonio. Dès lors, bien que l'utilisation de Goniosoft n'aurait pas introduit de biais majeurs, il s'est posé la question du facteur correctif à appliquer à un ensemble de mesures réalisées avec la configuration gognito. De plus, la correction de plusieurs fichiers issus de mesures successives comme décrit précédemment n'est pas possible avec la version actuelle de Goniosoft. Et ce pour des raisons simples de gestion du fichier géométrique généré par ce type de protocole. Le traitement par lot n'étant cependant qu'une histoire de programmation, les détails ne seront pas donnés ici. La démonstration suivante (de Éric Quirico) rapporte donc les détails menant à la détermination du facteur correctif pour les mesures réalisées en mode gognito :

La puissance dP émise par un élément de surface dS éclairée avec la luminance L et collectée selon

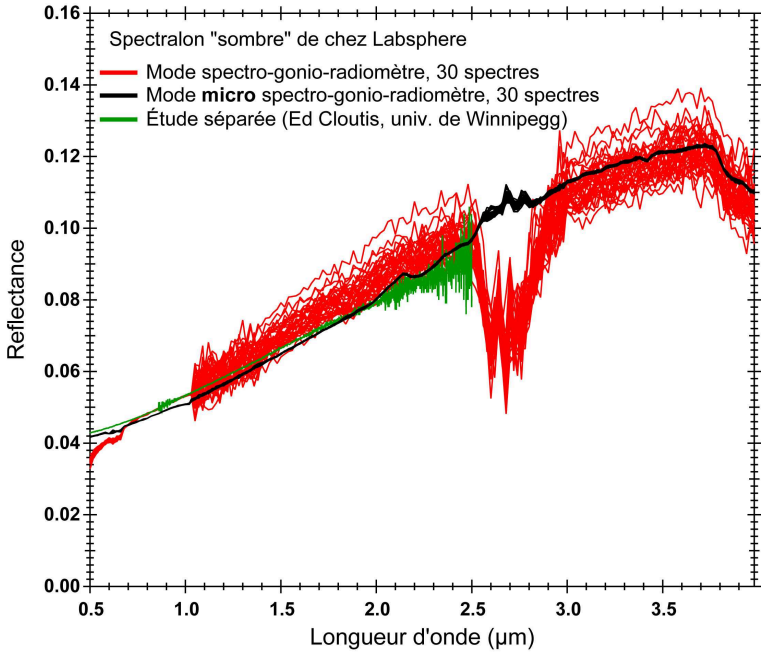


FIGURE 7.4 – Comparaison de mesures de Spectralon (surface Lambertienne sombre) avec différents concepts d'instruments entre 0.5 µm et 4.0 µm. Les courbes rouges ont été produites avec l'architecture « gonio » classique tandis que les courbes noires ont été réalisées avec le prototype du « gognito », utilisé dans cette étude. Cela démontre, avec la figure 7.3, sa performance à mesurer des échantillons sombres et ce avec une meilleure précision que le spectro-gonio-radiomètre classique. La courbe verte est issue d'une mesure indépendante avec un autre instrument. La bande d'absorption des courbes rouges à ~2.7 µm est due la vapeur d'eau atmosphérique. Source : Pierre Beck, communication personnelle.

l'angle solide $d\Omega$ avec une émergence e s'écrit :

$$dP = L \times dS \times \cos e$$

L'illumination se faisant avec un faisceau collimaté d'incidence i on a :

$$dP_E = L_E(i,e) \times \frac{d\Sigma}{\cos i} d\Omega \times \cos e$$

où $d\Sigma$ est la surface apparente vu depuis la source et $\frac{d\Sigma}{\cos i}$ la surface émettrice réelle (la tâche d'éclairement se déformant avec l'incidence).

Dans la calibration des données, il est à noter qu'une extrapolation du comportement du Spectralon a été réalisée à toutes les géométries afin de pouvoir appliquer sa correction sans avoir à le mesurer pour chaque mesure. Une mesure à $i = 0°$ et $e = 30°$ est ainsi suffisante même pour corriger des données acquises à $i = 15°$ et $e = -45°$ par exemple.

Ainsi, la puissance réfléchie par le Spectralon dans la configuration $i = 0°$ et $e = 30°$ est :

$$dP_{Sp} = L_{Sp}(0,30) \times d\Sigma \times d\Omega \times \cos 30$$

Notre instrument renvoie ainsi le rapport de la mesure de l'échantillon sur la référence, soit :

$$R = \frac{dP_E}{dP_{Sp}} = \frac{L_E(i,e) \times \cos e}{L_{Sp}(0,30) \times \cos i \times \cos 30} \tag{7.1}$$

Quant au REFF, il est égal, par définition, à :

$$REFF(i,e) = \frac{L_E(i,e)}{L_{Lambert}(i)}$$

où $L_{Lambert}(i)$ est la radiance d'une surface Lambertienne.
On peut alors transformer l'équation 7.1 en :

$$R = \frac{L_E(i,e)}{L_{Lambert}(i)} \times \frac{L_{Lambert}(i,e)}{L_{Sp}(0,30) \times \cos i \times \cos 30} \times \cos e \tag{7.2}$$

Par ailleurs, avec J l'irradiance incidente dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation, on a :

$$L_{Lambert}(i) = \frac{1}{\pi} \times J \times \cos i$$

Sachant que la luminance du spectralon L_{Sp} est Lambertienne et en substituant dans l'équation (2) on obtient :

$$R = REFF \times \frac{\pi \times J \times \cos i \times \cos e}{\pi \times J \times \cos(0) \times \cos i \times \cos 30}$$

Ce qui donne en simplifiant la formule finale applicable aux données, quelles que soient leurs géométries d'acquisition :

$$REFF(i,e) = R \times \frac{\cos 30}{\cos e}$$

On remarque notamment que l'incidence n'a pas d'influence directe sur la correction. En revanche, ce calcul ne s'applique que si la taille de la zone éclairée est plus petite que la taille de la zone mesurée. C'est le cas en mode « gognito ». Ce qui n'empêche pas la tâche d'illumination, d'environ 7.5 mm de diamètre, de varier avec l'incidence. Cette contrainte fixe ainsi l'angle d'incidence à 68° maximum.

Un programme indépendant a été réalisé afin d'intégrer cette correction. Ce programme repose principalement sur Goniosoft dont il reprend les principales routines de corrections appliquées aux références spectrales notamment. Ne proposant pas une interface aussi complète que Goniosoft (basée sur les widgets IDL) il reste cependant utilisable sur n'importe quelle machine disposant d'une version récente de IDL Virtual Machine puisque l'utilisateur sera simplement sollicité pour indiquer les fichiers géométriques, de données et les références spectrales (Spectralon© et Infragold©) à calibrer. L'avantage du programme est double : il permet de corriger aussi bien un seul spectre qu'une série multi-angulaire. Le seul inconvénient à ce jour est de ne pas être utilisable sur l'ordinateur lié à l'instrument en raison d'une version trop ancienne d'IDL Virtual Machine. Ce problème reste cependant facilement contournable en utilisant un ordinateur personnel distinct.

7.2 Spectre de référence de 67P/CG

7.2.1 Sélection et répartition des données

Le jeu de données VIRTIS a été décrit précisément dans le chapitre 4 de la partie II. Cette section se concentre uniquement sur les données utilisées à des fins de comparaison entre les spectres de laboratoire et un spectre autant que possible représentatif de la surface de la comète. Plusieurs paramètres sont à prendre en compte afin de construire un tel spectre.

Un des premiers est le facteur temporel. Il aurait été possible de choisir les observations sans tenir compte de ce facteur. Cependant, plusieurs études ont montré l'existence de changements saisonniers à la surface de la comète, notamment le soulèvement de poussières en raison de l'augmentation de l'activité (Ciarniello et al., 2016; Filacchione et al., 2016a; Fornasier et al., 2016). Ainsi, par prudence, il est raisonnable de n'utiliser que des données acquises pendant une période restreinte et ce, afin de limiter les variations trop importantes ayant notamment un effet sur la pente spectrale par exemple.

Suite à cette considération, c'est la couverture spatiale et l'abondance en données qui doivent être considérées. C'est en début de mission qu'une stratégie de cartographie est adoptée, ce qui implique une large couverture spatiale du noyau. De ce fait, et à la vue du jeu de données VIRTIS décrit dans la section 4.3 de la partie II, on constate que les paramètres orbitaux (distance à la comète), la géométrie des observations et leur nombre favorisent le début de mission. Typiquement, le début de mission (MTP006) – soit en août 2014 – est la période la plus propice pour chercher les observations qui nous intéressent ici. Notons aussi qu'une période plus tardive que mai 2015 n'aurait pas été possible en raison de l'approche du périhélie d'une part mais surtout à cause de l'indisponibilité de VIRTIS-M-IR.

Les critères sont simples : seules des observations proches de 0° en incidence et de 30° en émergence peuvent être utilisées afin de les comparer aux spectres de laboratoire acquis dans cette configuration. Elles doivent aussi, si possible, être diversifiées en termes de géographie. Enfin dernier point, pour garder une continuité dans le spectre entre le visible et l'infrarouge, il est intéressant d'utiliser les cubes hyperspectraux de ces deux domaines acquis simultanément (et qui auront donc observé les mêmes régions avec la même géométrie), ce qui n'est pas le cas d'office. Il se trouve que la série de cube se trouvant en annexe (9.5.3) répond parfaitement à ces critères. Acquis le 14 et 15 août 2014 en l'espace de 24h sur des régions variées, ces observations (ou pixels, qui correspondent aux points bleus sur la carte de la figure 7.5) se trouvent à des incidences comprises entre 0° et 5° et à des émergences comprises entre 28° et 32°. De ces deux fois 16 cubes, environ 900 pixels ont été retenus pour chaque voie (visible et infrarouge) avant de traiter ces données pour la construction d'un spectre de référence.

7.2.2 Traitement des données

Le spectre de référence utilisé dans cette étude est présenté entre 0.4 µm et 4 µm dans la figure 7.6. Un simple traitement consistant à s'affranchir de la dispersion éventuelle des données a été appliqué. Il consiste à restreindre les données sélectionnées à un intervalle centré sur la médiane et défini par l'écart

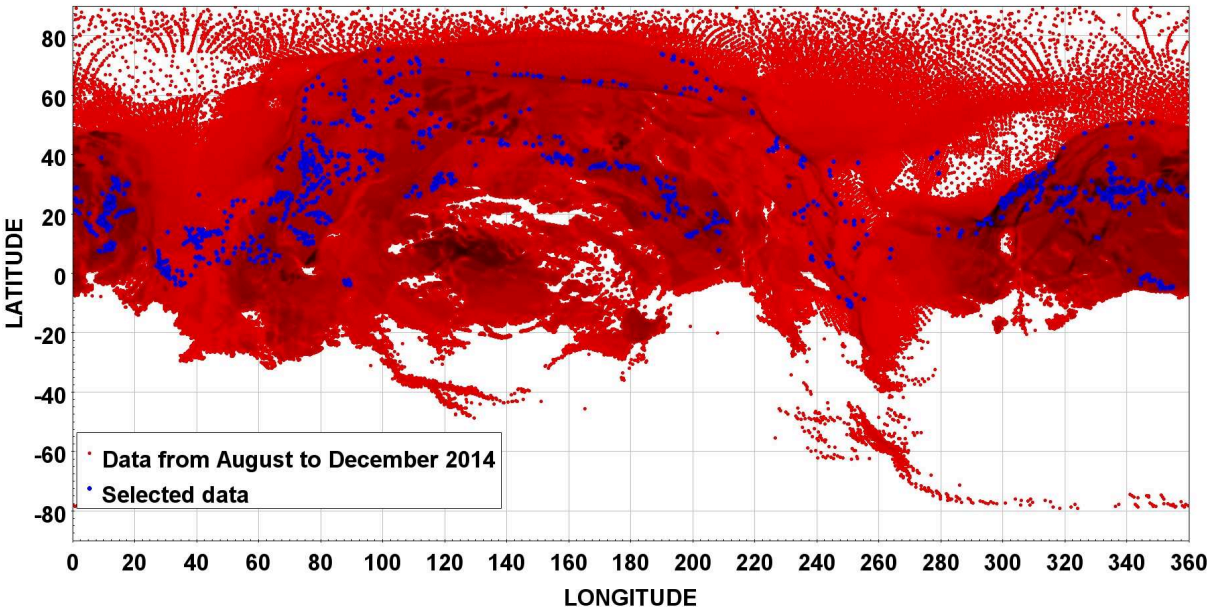


FIGURE 7.5 – Carte de la comète 67P/CG à partir d'observations VIRTIS-M visible et s'étalant, en rouge, d'août à décembre 2014, et en bleu du 14 au 15 août 2014 en l'espace de 24 heures (16 cubes). Chaque point représente un spectre et 900 spectres (en bleu) ont été utilisés pour construire le spectre de référence de la figure 7.6.

type multiplié par un coefficient (choisi pour que cet intervalle sélectionné soit plus ou moins large). Cette méthode de *sigma clipping* a été appliquée à chaque longueur d'onde. Partant de 900 spectres environ on arrive à un résultat satisfaisant et n'excluant que peu de données puisqu'en moyenne 850 valeurs sur 900 (soit 94%) sont gardées dans chaque canal.

Le spectre en lui-même résulte de la médiane de ces ~850 spectres restant. Les barres d'erreurs sont définies comme l'écart type de la distribution des observations pour chaque longueur d'onde. On notera d'après la figure 7.6 que les données VIRTIS-M visible ne sont pas représentées entre 0.8 µm et 1.0 µm. Abordé dans la section 4.2.3 page 59 on rappelle que cette zone subie un artéfact qui n'a pu être corrigé. Cet intervalle a donc été supprimé ici pour des raisons de clarté. La partie grisée du graphique correspond à la partie non étudiée du spectre VIRTIS et de ceux issus des mesures de laboratoire. Plusieurs raisons justifient cela : d'une part, l'émission thermique, non corrigée ici, est visible dès 3.5 µm ; et d'autre part, cette étude ne vise pas à reproduire la bande d'absorption à 3.2 µm. La dernière raison est propre aux mesures des échantillons pour lesquels une forte bande d'absorption due à la vapeur d'eau existe à partir de 2.7 µm.

7.3 Matériaux utilisés

Le choix des matériaux entrant dans la constitution des mélanges réalisés est une étape primordiale. Le but étant de se rapprocher le plus possible de la composition d'une comète, ici 67P/Churyumov-Gerasimenko. Trois types de matériaux ont été utilisés lors de ces expériences. Bien que tous les trois

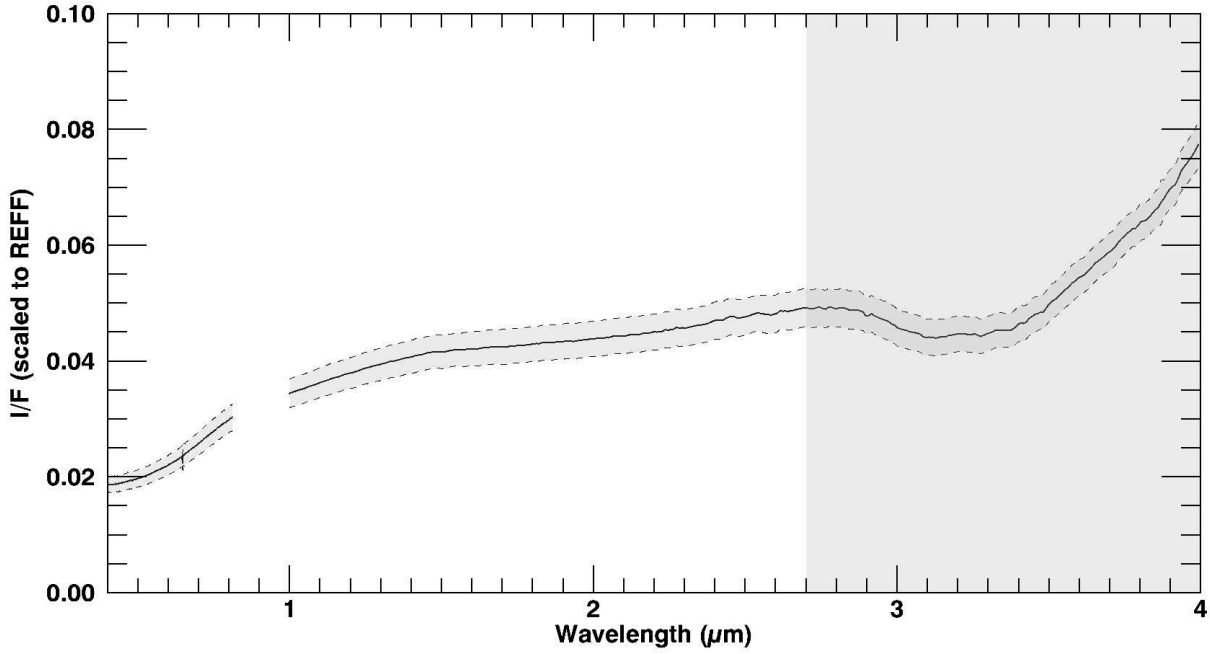


FIGURE 7.6 – Spectre VIRTIS de référence utilisé pour la comparaison avec les spectres de laboratoire. Issu d'une médiane d'environ 850 spectres, il est ici représenté dans le même intervalle spectral que les mesures faites sur les échantillons, entre 0.4 µm et 4.0 µm. La partie entre 0.8–1.0 µm a été retirée en raison de la présence d'un artéfact. La zone grisée représente la partie non étudiée des spectres de laboratoire et du spectre VIRTIS.

soient d'origine terrestre, certains d'entre eux sont tout de même observés dans les comètes. Leurs caractéristiques générales et spectrales sont décrites dans les sous-sections suivantes.

Note : Dans tous les spectres présentés ci-dessous, on trouve les signatures spectrales dues au groupement OH, à l'eau adsorbée à la surface des échantillons ou celle présente dans l'atmosphère, les mesures ne se faisant pas sous atmosphère purgée. Les signatures dans notre gamme spectrale se trouvent par exemple à 1.4 µm, 1.92 µm, 2.7 µm et 2.9 µm (Adams, 1975; Clark, 1999).

7.3.1 Matière organique

7.3.1.1 Charbon - Le PSOC 1532

Généralités Depuis la visite de 1P/Halley par la sonde Giotto et ses consœurs, on sait que les comètes renferment en quantité de la matière organique, des molécules carbonées complexes et principalement composées de Carbone, Hydrogène, Oxygène et azote (N) (d'où leur surnom de CHON) (Fomenkova et al., 1994). Certaines expériences étudiant les processus de surfaces cométaires utilisent des tholins en tant qu'analogues de matière organique (Pommerol et al., 2015; Poch et al., 2016a,b). Il est important dans cette étude de travailler avec des échantillons bien caractérisés du point de vue de la composition. Les tholins sont des composés complexes, variés quant au nombre de molécules qu'ils contiennent et les études destinées à les caractériser sont nombreuses (voir Poch et al. (2016a) et références internes) ; leur intérêt en planétologie vient du fait qu'ils sont initialement synthétisés dans l'atmosphère de Titan.

Étudiés depuis longtemps, il est aujourd'hui possible d'en produire des quantités satisfaisantes grâce à des expériences comme PAMPRE (Carrasco et al., 2009). Bien que de nombreuses études montrent que, de manière générale, ces composés possèdent des points communs avec la matière organique d'intérêt astrophysique (c'est à dire celle présente dans le milieu interstellaire, sur les objets primitifs du système solaire) elles indiquent aussi des différences avec celles-ci (Quirico et al., 2008; Bonnet et al., 2015). Par ailleurs, l'étude réalisée par Quirico et al. (2016), qui porte spécifiquement sur l'interprétation des données de VIRTIS et sur les possibles composés qui contribuent au spectre de 67P exclut des composés de type tholins pour expliquer la bande d'absorption à 3.2 µm par exemple. Cette même étude identifie également d'autres composés comme étant plus représentatifs de la matière organique cométaire ou au moins de 67P. On ajoutera par ailleurs que ceux-ci sont relativement clairs, notamment dans le visible contrairement à d'autres types de matière organique (charbons, goudrons...) (De Bergh et al., 2008).

En tant que matière organique, c'est un charbon qui a été utilisé dans les mélanges préparés et mesurés. Ce matériau représente la matière carbonée, pouvant potentiellement se rapprocher le plus de ce qui est présent au sein des comètes ou des météorites (Moroz et al., 1998; Quirico et al., 2016). Cette roche sédimentaire est issue de la carbonisation de matière organique (principalement végétale) qui a lieu pendant plusieurs centaines de millions d'années. Les conditions de températures et de pressions ainsi que le contexte géologique variant selon les régions, il existe plusieurs types de charbons. De même, plusieurs classifications existent pour caractériser les charbons ou les bitumes mais ne seront pas abordées ici. Le lecteur est donc renvoyé vers les études de Moroz et al. (1998) et Quirico et al. (2016) qui rapportent une variété de ces matériaux pour l'étude des comètes, astéroïdes et météorites.

Le choix de ce charbon en particulier fait suite à l'étude de Quirico et al. (2016) qui a analysé différents charbons, mais aussi goudrons de houille (par la suite appelé goudrons – « *coal tars* » en anglais), afin d'en étudier les propriétés chimiques et optiques pour les comparer avec les IDPs, UCAMMs ou météorites. Pour la présente étude, un charbon d'Alaska, le PSOC 1532, a été utilisé. Fourni par la Penn State University (PSOC 1532 signifiant *Penn State Office of Coal*), le PSOC 1532 se trouve en effet être un bon candidat pour la matière carbonée cométaire d'un point de vue chimique, et ce pour plusieurs raisons exposées ci-dessous.

Il est intéressant de noter qu'entre les charbons type PSOC 1532 et les goudrons, selon un critère basé uniquement sur le niveau de réflectance, ce sont bien les goudrons ou les charbons les plus matures qui se rapprochent le plus du niveau de réflectance de 67P. C'est ce que la figure 7.7 illustre. La maturité d'un charbon est calculée selon la réflectance de la vitrinite, un composé organique du charbon qui compose l'espèce en question, indiquée dans la légende par la valeur « VR » (en %). Cet indicateur traduit en quelque sorte l'historique des températures que l'échantillon a connu. Plus elle est élevée, plus le charbon a subi des températures importantes, plus il est mature. C'est le cas par exemple du PSOC 15321468, dont l'albédo est similaire à celui de 67P. Notre charbon, le PSOC 1532, possède quant à lui une valeur de réflectance de la vitrinite égale à 0.33% : c'est un charbon peu mature. Contrairement au PSOC 15321468 ou au goudron CT1, et bien que le PSOC 1532 soit absorbant dans le visible, son albédo dans l'infrarouge est élevé. Toujours selon un critère optique, ce n'est pas donc pas un tel composé qui est recherché comme possédant la capacité à assombrir un mélange censé reproduire les propriétés spectrales de 67P.

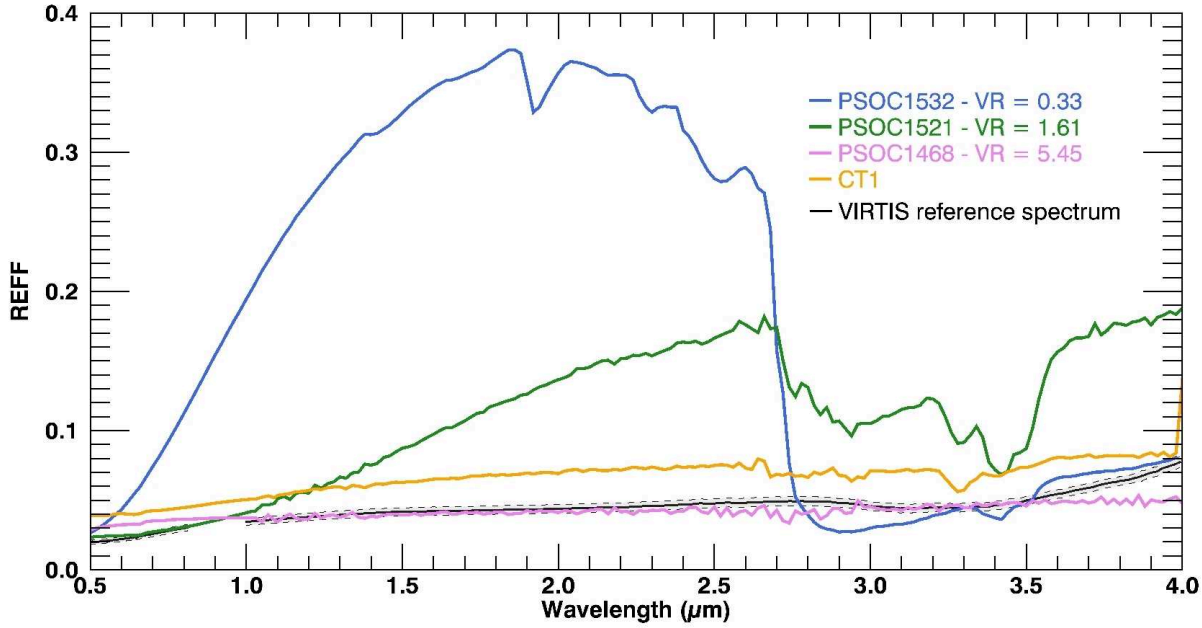


FIGURE 7.7 – Spectres de réflectance de différents charbons (PSOC 1532) et goudrons (CT) ayant des maturités variées (indiqué par la valeur de réflectance de la vitrinite : VR) et comparés au spectre VIRTIS de référence de la surface *de 67P.* Adapté de Quirico et al. (2016).

Cependant, Quirico et al. (2016) montrent que les charbons matures et goudrons ne possèdent pas la même structure chimique (aromaticité, taille et distribution des espèces aromatiques...) et sont moins réfractaires que la matière organique présente dans les IDPs, les micrométéorites ou que la matière organique insoluble (IOM) des chondrites carbonées. Bien qu'optiquement très proche de 67P dans le visible et l'infrarouge, ces composés ne sont donc pas de bons analogues d'un point de vue de leur composition chimique. En revanche, le PSOC 1532 possède lui des similarités avec la matière organique de la météorite d'Orgueil – qui représente 4% en masse de la météorite et dont 70% est de type matière organique insoluble. Bien que leurs réflectances ne soient pas similaires, leurs compositions sont notamment voisines concernant les rapports méthylène sur méthyle $\left(\frac{CH_2}{CH_3}\right)$, les groupements carbonyles $(C = O)$ ou aromatiques $(C = C)$ par exemple (Quirico et al., 2016). Le rapport élémentaire $\frac{H}{C}$ est également une autre caractéristique commune entre le PSOC 1532 et les IDPs cette fois-ci (Aléon et al., 2001; Quirico et al., 2016).

En plus de l'étude de Quirico et al. (2016) sur des matériaux d'origine terrestre, des observations in situ menées par l'instrument COSIMA sont venues renforcer les hypothèses concernant la nature de la matière organique pouvant composer le noyau de 67P. Fray et al. (2016) propose en effet, d'après les analyses menées sur des grains de poussières capturés dans la coma, que la matière organique de 67P se trouve plutôt à l'état de gros composés moléculaires, de composition semblable aux IDPs, aux UCAMMs mais aussi à l'IOM des chondrites carbonées et de manière générale proche des CHON, introduits suite à la rencontre entre Giotto et Véga 1 et la comète 1P/Halley en 1986 (Kissel and Krueger, 1987a,b; Jessberger et al., 1988; Fomenkova et al., 1994)

L'étude menée par Fray et al. (2016) est illustrée par la figure 7.8, laquelle rapporte les détections des ions C^+, CH^+, $CH_2{}^+$, $CH_3{}^+$ dans deux poussières de la comète 67P (Kenneth et Juliette) ainsi que dans

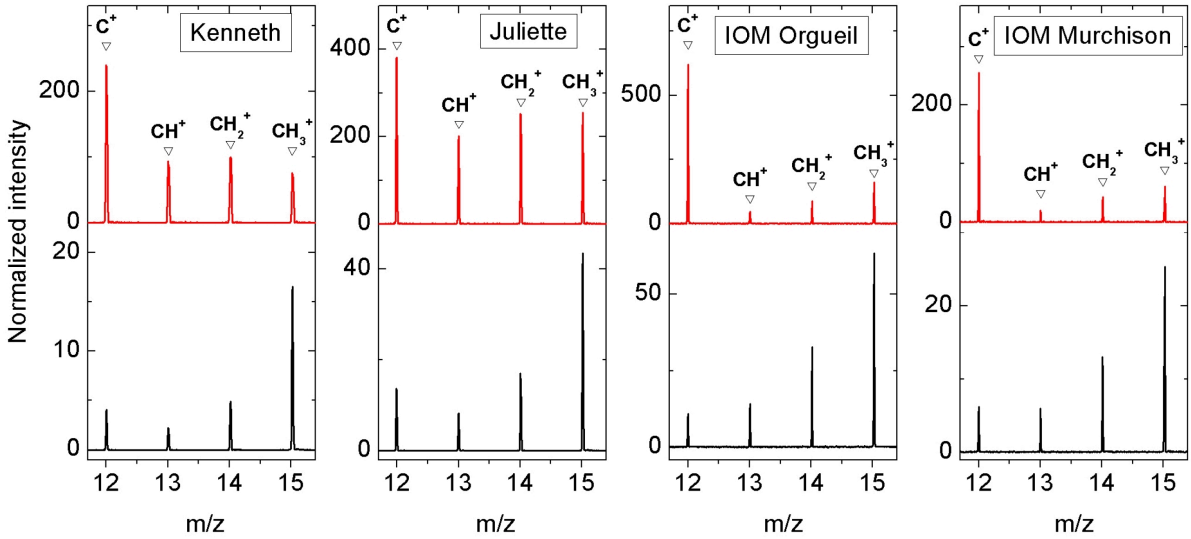


FIGURE 7.8 – Spectres de détection des ions C^+, CH^+, $CH_2{}^+$, $CH_3{}^+$ sur les poussières Kenneth et Juliette de la comète 67P par l'instrument COSIMA de la sonde Rosetta. Les spectres de la matière organique insoluble des chondrites carbonées Orgueil et Murchison ont été obtenues grâce à un modèle de l'instrument resté au sol. Les spectres rouges sont ceux mesurés sur les poussières et l'IOM tandis que les spectres noirs sont ceux de fond, mesurés sur la cible sur laquelle les particules sont présentes. Figure issue de Fray et al. (2016).

l'IOM des météorites d'Orgueil et de Murchison. Deux points importants sont à souligner ici. D'une part, la plus forte intensité du pic de C^+ par rapport à ceux de CH^+, $CH_2{}^+$, $CH_3{}^+$ indique que la matière organique présente dans les poussières analysées possède un rapport $\frac{H}{C}$ plus faible que les molécules étudiées lors de la calibration de l'instrument (Fray et al., 2016). D'autre part, la similarité entre les mesures faites sur l'IOM et celles réalisées sur les poussières capturées dans la coma de 67P est renforcée par l'absence de détection d'ions d'origine organique au-delà d'un rapport $\frac{m}{z} > 50$ (Fray et al., 2016).

Ainsi, les études de Quirico et al. (2016) et de Fray et al. (2016) se complètent et confortent l'idée que les matériaux organiques de 67P ressemblent à l'IOM des chondrites carbonées. En montrant que le PSOC 1532 est également proche de l'IOM dans certaines de ces caractéristiques (notamment chimiques), Quirico et al. (2016) donnent un argument de poids quant à son usage dans les mélanges réalisés et mesurés dans cette étude.

Caractéristiques spectrales Entre 0.5 µm et 3.0 µm, le spectre du PSOC 1532 a globalement l'aspect d'une cloche (spectre C, figure 7.11). Dans le détail, il possède un caractère très absorbant dans le visible tout en présentant une pente spectrale rouge très importante du milieu du visible jusqu'à environ 1.9 µm. Entre 2.15 µm et 2.60 µm, plusieurs petites bandes d'absorptions se superposent. Elles sont provoquées, la plupart du temps, par les signatures dues à l'eau, à la combinaison des modes de vibrations fondamentales de composés organiques (Clark, 1999) ainsi qu'à celle de la liaison métal-OH et OH dans le cas minéraux argileux par exemple (Clark, 1999; Poulet et al., 2005) – dans le cas présent, on retiendra les deux premières possibilités puisque nous ne sommes pas en présence d'argiles.

7.3.2 Sulfures de fer

Les sulfures de fer sont donc des minéraux dit opaques. La partie imaginaire de l'indice de réfraction du fer étant élevée dans le visible et l'infrarouge, celle-ci augmentant même vers les plus grandes longueurs d'onde (Ordal et al., 1983). Il existe plusieurs variétés de sulfures de fer : pyrite(FeS_2), pyrrhotite ($Fe_{1-x}S$), troïlite (FeS), pentlandite ($(Fe,Ni)_9S_8$)...) pour ne citer qu'eux. La distinction n'est pas toujours faites entre troïlite et pyrrhotite (Zolensky et al., 2006, 2008) car la stœchiométrie exacte est parfois difficile à déterminer ou nécessite des mesures précises. Il se trouve que la troïlite appartient au groupe des pyrrhotites. Contrairement à la pyrrhotite elle ne possède pas de sites vacants dans sa maille et n'est pas déficitaire en atome de fer, ce qui fait d'elle un minéral non magnétique.

Les sulfures de fer forment des cristaux – la structure du réseau cristallin variant selon la variété – et peuvent donc être très réfléchissants selon le polissage appliqué à leur surface (voir les photographies de la figure 7.9). Plus le matériau est poli moins il comporte de défauts aux interfaces (en surface typiquement). L'absence de défauts ou le fait que leurs tailles soient inférieures à quelques centaines de nanomètres induit alors un effet miroir (pour les longueurs d'onde visibles par notre œil). Le photon arrivant à l'interface ne pénètre pas dans le cristal et la réflexion est de type spéculaire, le reflet étant intense car l'énergie est focalisée selon une direction précise, dictée par les lois de Snell-Descartes. Ces détails seront discutés dans la section 9. La différence majeure avec d'autres minéraux est que les sulfures de fer sont opaques : il possède un fort pouvoir réflecteur et sont très absorbant, la lumière ne pénètre donc pas ou très peu en leur sein. Leur éclat est donc de type métallique (comme l'or par exemple).

Le choix d'inclure un sulfure de fer dans les mélanges réalisés dans ces expériences n'est pas anodin. Les espèces évoquées précédemment sont toutes identifiées couramment dans les météorites (Ramdohr, 1963; Geiger and Bischoff, 1995; Bullock et al., 2010; Kimura et al., 2011). Les plus abondantes relatées dans la littérature étant cependant la troïlite et la pyrrhotite. L'étude de 135 météorites rocheuses par Ramdohr (1963) fait part de la présence de troïlite dans chacune d'entre elles contre une seule occurrence de pyrite alors que cette dernière semble la plus abondante sur Terre (Belzile et al., 2004). La pyrrhotite est aussi rapportée par plusieurs études et ce, encore une fois, dans des météorites (Nichiporuk and Chodos, 1959; Kerridge, 1970; Geiger and Bischoff, 1995; Bullock et al., 2010; Kimura et al., 2011). On notera que les sulfures de fer ont également été identifiés dans les météorites martiennes (Boctor et al., 1976; Greenwood et al., 2000)) ainsi que dans les roches lunaires, en particulier la troïlite (Evans, 1970).

Concernant cette étude ce sont leur présence dans les comètes qui nous intéresse. La détection est parfois ambigüe et dépendante d'un modèle comme c'est le cas avec les observations de 9P/Tempel 1 dans l'infrarouge grâce au télescope spatial Spitzer par Lisse et al. (2006). Elle peut aussi être indirecte : Fulle et al. (2007) relate la détection grâce à la sonde STEREO d'une queue de fer atomique derrière la comète McNaught 2006P1. L'hypothèse avancée étant que ce fer vient de la troïlite présente à la surface du noyau. Enfin, il est régulièrement rapporté dans l'analyse de micrométéorites ou de poussières interplanétaires, ayant une origine cométaire, la présence de ces sulfures de fer (Engrand et al., 2007; Duprat et al., 2007; Dobrica et al., 2009, 2012; Engrand et al., 2016). Les observations les plus marquantes de la détection de sulfures de fer, et en particulier de pyrrhotite, de troïlite et dans une moindre mesure de pentlandite, ont été faites via l'analyse des poussières prélevées dans la queue de la comète 81P/Wild 2

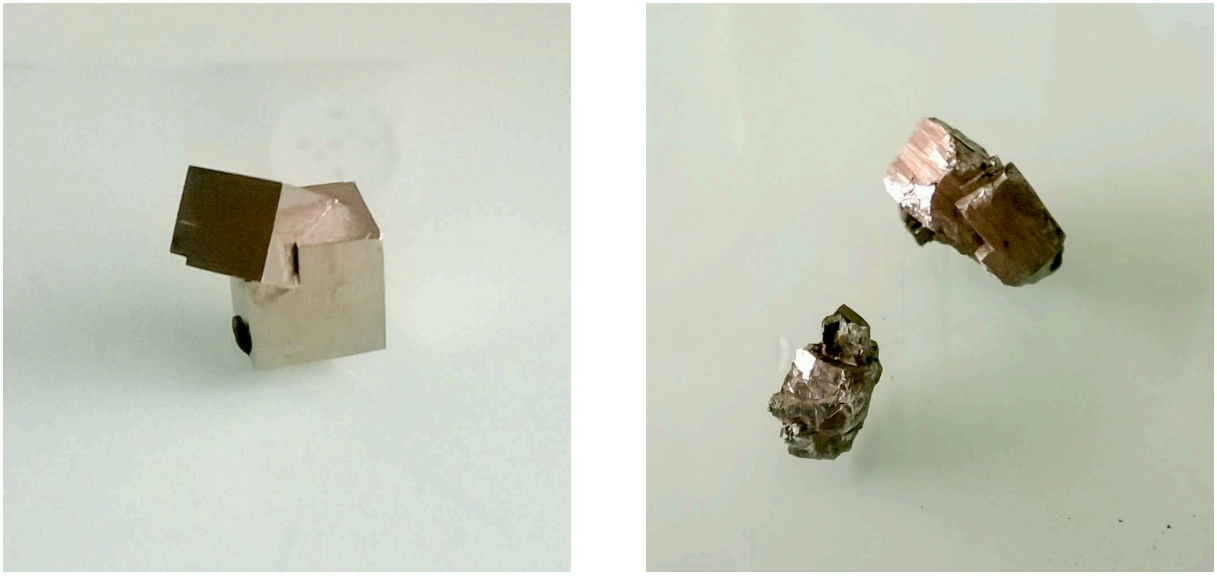


FIGURE 7.9 – Photographies des échantillons de cristaux de pyrite (à gauche) et de pyrrhotite (à droite), de taille centimétrique, utilisé dans les expériences.

par la sonde américaine Stardust en 2004 (Zolensky et al., 2006; Brownlee, 2014). Enfin, bien que non quantifiée précisément, la présence de sulfures de fer a été rapportée dans les analyses des poussières de la comète 1P/Halley grâce aux instruments PUMA sur les sondes VEGA (Mukhin et al., 1987; Langevin et al., 1987; Jessberger et al., 1988). Dans cette étude nous nous limitons à l'étude de deux espèces : la pyrite et la pyrrhotite.

7.3.2.1 Pyrite

Généralités La pyrite (FeS_2) est un des deux sulfures de fer ayant été testé. La pyrite (voir figure 7.10) fait partie des sulfures de fer relativement simple du point de vue de sa formule chimique mais peu observée d'après la littérature. Seul l'étude de Geiger and Bischoff (1995) semble rapporter quelques occurrences dans des météorites alors que rares sont les autres analyses où celles-ci sont notables. De plus, elle n'a pas été observée dans les poussières, surfaces ou queues cométaires, que ce soit de manière directe ou indirecte. La question se pose donc de la choisir ici.

La disponibilité d'un échantillon de taille centimétrique et d'environ 8.5g (photo de gauche figure 7.9) a constitué une opportunité facile à mettre en œuvre, permettant d'utiliser un matériau similaire à la pyrrhotite alors que celle-ci n'était pas encore disponible et qu'elle le serait plus tard en petite quantité. De plus, cette échantillon a pu servir de « cobaye », pour les premiers tests du broyeur planétaire (voir 7.4.1). Son avantage est qu'elle possède à peu près les mêmes propriétés mécaniques que la pyrrhotite. S'ajoute à cela un argument ayant plus de poids puisque d'un point de vue spectral la pyrite se comporte de la même façon que la troïlite ou la pyrrhotite, à savoir que sa réflectance diminue en même temps que la taille des grains.

FIGURE 7.10 – La pyrite c'est aussi ça ! Pour le plaisir des yeux. A gauche, photographie d'une affiche de la galerie des minéraux des Mines Paris Tech. La pyrite, choquée contre un morceau de quartz par exemple, va provoquer une étincelle permettant d'allumer un feu. Cela s'accompagne rapidement de son oxydation, réaction qui dégage une chaleur importante. A droite, pyrite de la galerie des Mines Paris Tech.

Tester la pyrite, biens moins rare que la pyrrhotite par exemple (Belzile et al., 2004), disponible immédiatement et partageant avec celle-ci des caractéristiques (mécanique et spectrale) intéressantes pour notre étude n'est donc pas inutile et dénué de sens.

Caractéristiques spectrales La pyrite possède un spectre presque similaire à la pyrrhotite (voir 7.3.2.2), c'est à dire marqué par une pente spectrale faible, voire plate, et l'absence de bandes d'absorption. On note cependant une réflectance plus élevée dans l'infrarouge avec une pente rouge de 0.75 µm à 1.5 µm environ, suivi d'un plateau jusqu'à 2.7 µm (spectre D, figure7.11).

7.3.2.2 Pyrrhotite

Généralités La formule générale de la pyrrhotite est $Fe_{1-x}S$. L'indice x varie environ entre 0 et 0.20, la limite supérieure n'étant visiblement pas définie précisément puisqu'on trouve différentes valeurs selon les sources, 0.125 d'après Belzile et al. (2004), 0.17 d'après Mindat.org. Cependant, on retiendra que l'espèce minérale la plus courante est de formule Fe_7S_8 (soit $x = 0.125$) (Mindat.org).

La pyrrhotite est un meilleur choix comme matériau représentatif des sulfures de fer extraterrestres. Elle est observée dans de nombreuses météorites mais aussi dans les poussières ou matériaux cométaires, même si ces détections sont parfois indirectes. Si la pyrrhotite, comme la troïlite, la pyrite ou les autres sulfures de fer, est peu mentionnée dans les comètes c'est sans doute avant tout par manque d'échantillons. De plus, ces matériaux ne sont jamais ou que très rarement observables dans la coma. Les températures nécessaires pour les faire évaporer sont importantes comme le souligne la potentielle détection

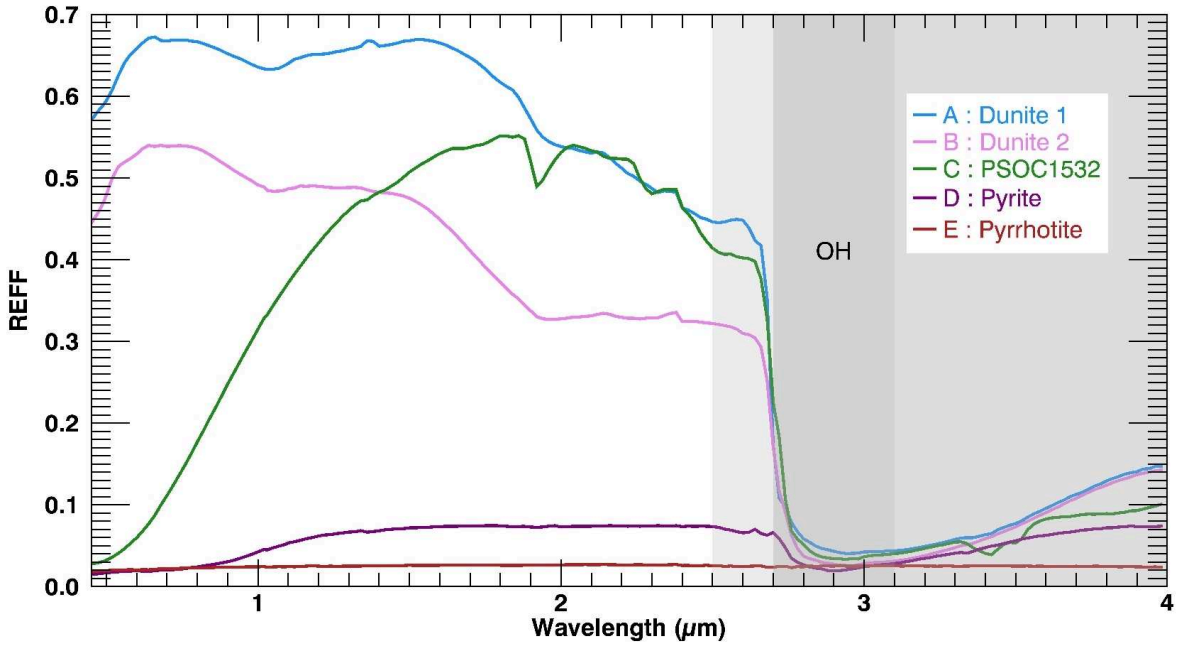


FIGURE 7.11 – Spectres des différents matériaux utilisés lors des expériences. Tous sont à l'état de poudre très fine. La partie grisée claire du spectre, de 2.7 µm à 4.0 µm n'a pas été étudiée (voir section 7.2.2).

de la queue de fer atomique de la comète McNaught 2006P1 par Fulle et al. (2007). Le fait que cette comète possède un périhélie proche du Soleil (moins de 0.2 UA) permet d'atteindre des températures importantes, supérieures à 680K, et compatibles avec la sublimation du fer à partir de grain de troïlite à cette distance (Pollack et al., 1994). C'est ce que suggère l'étude de Fulle et al. (2007) qui par ailleurs ne recense qu'une seule autre détection du fer : dans la comète Ikkeya-Seki 1965S1 par Preston (1967). Ces deux études sont à compléter par celle plus récente de Bockelée-Morvan et al. (soumis) qui explique dans certains cas la température de couleur mesurée dans un outburst – autour de 600K – en incluant dans son modèle la présence de grains micrométriques de FeS, à hauteur de 6% en volume ; d'après les proportions proposées par Fulle et al. (2016a).

L'utilisation de ce minéral pour réaliser un analogue cométaire s'appuie donc sur les multiples observations faites dans les météorites (Ramdohr, 1963; Geiger and Bischoff, 1995; Bullock et al., 2005, 2010; Kimura et al., 2011) ; dans les GEMS (« Glass with Embedded Metal and Sulphides ») présents dans les UCAMMs ou les IDPs (Bradley et al., 1999; Dobrica et al., 2012), d'origines cométaires ; de même que les détections, souvent indirectes, dans les queues cométaires ou les comas (Lisse et al., 2006; Fulle et al., 2007) ; et enfin les détections directes dans les grains de la comète Wild 2 (Zolensky et al., 2006) ou dans ceux de la comète de Halley (Langevin et al., 1987; Jessberger et al., 1988; Lawler et al., 1989; Schulze et al., 1997).

Concernant la présence de pyrrhotite dans les IDPs, souvent supposées d'origine cométaire et donc d'un grand intérêt, il est important de souligner l'étude de Dai and Bradley (2001)qui relèvent et caractérisent la pyrrhotite dans neuf IDPs, mais aussi l'absence de troïlite de celles-ci. Cependant, les IDPs sont chauffées au-delà de 500°C lors de la rentrée dans l'atmosphère (Love and Brownlee, 1991) et il est ainsi possible que la pyrrhotite soit un produit secondaire, d'altération, qui se forme en raison de ces

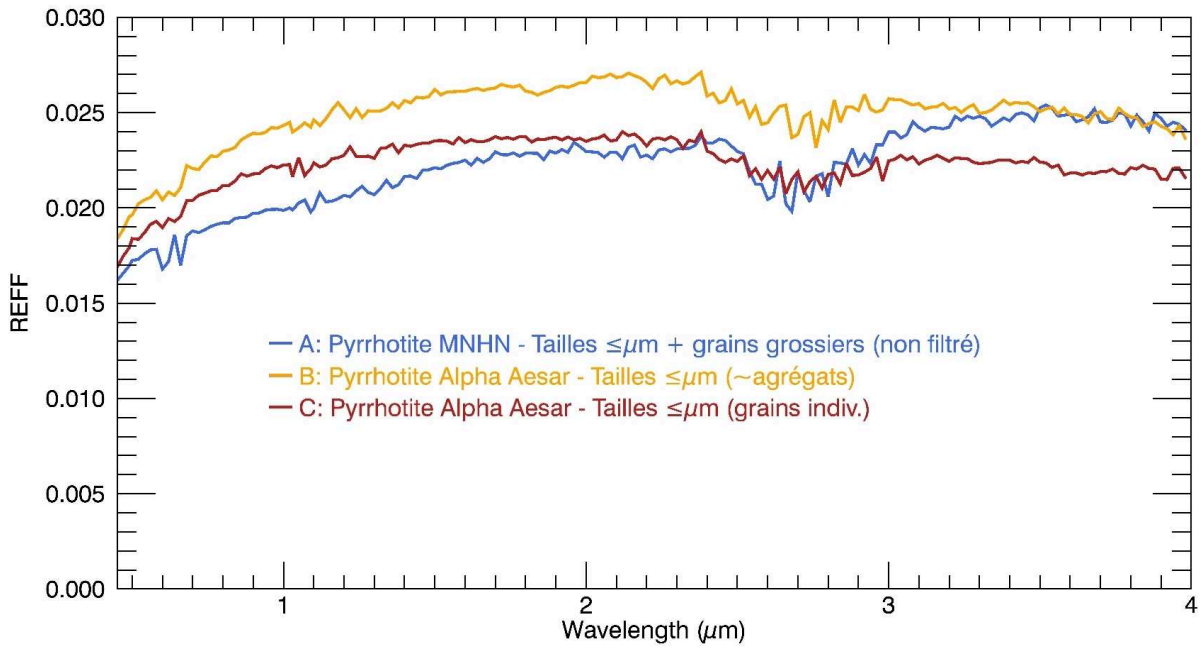


FIGURE 7.12 – Spectres de poudres de pyrrhotite utilisées lors des expériences. Les échantillons B et C sont des fines poudres dont les particules sont de l'ordre du micromètre et inférieur tandis que l'échantillon A contient quelques grains plus gros, mal broyés, car il n'a pas été tamisé après broyage.

fortes températures. Il n'en reste pas moins que la pyrrhotite et la troïlite sont proches en termes de caractéristiques, d'autant plus pour des mesures en réflectance.

Deux pyrrhotites ont été utilisées dans les expériences présentées ci-dessous. Un de ces échantillons (photographie de droite de la figure 7.9), fourni par Olivier Poch de l'université de Bern a été acheté via la société Alpha Aesar et est de stœchiométrie connue avec une formule Fe_7S_8 ($x = 0.125$ dans ce cas). L'autre échantillon a été fourni par le Muséum National d'Histoire Naturelle de Paris. Une analyse par microfluorescence des rayons X (microXRF) a été réalisée au laboratoire ISTerre de l'université de Grenoble. Cette technique consiste à analyser l'émission de rayons X par un échantillon, de roche par exemple, bombardé avec des rayons de la même gamme d'énergie. Cependant, bien qu'elle permette d'évaluer la stœchiométrie de l'échantillon de pyrrhotite – en l'occurrence $Fe_{0.35}S$ – les résultats restent imprécis en l'absence de standards. Il n'est alors pas raisonnable de s'appuyer dessus pour discuter de la composition exacte de l'échantillon provenant du MNHN.

Toutefois, une comparaison entre les spectres des deux échantillons de pyrrhotite permet de constater la faible différence qu'il existe entre eux. Dans la figure 7.12, le spectre A correspond à la pyrrhotite du MNHN. On note une légère différence avec la pyrrhotite venant de Alpha Aesar (spectres B et C – issus de deux broyages différents). Cependant, ces variations sont probablement dues à des différences de taille de grains entre ces trois échantillons et non à une différence de composition, de stœchiométrie ou d'oxydation (voir ci-dessous). Ainsi, par la suite, et malgré l'utilisation de deux échantillons différents, il sera fait référence à la pyrrhotite sans préciser quelle espèce.

Un point sensible concerne l'oxydation des sulfures de fer. Une revue sur l'oxydation de la pyrrhotite est faite par Belzile et al. (2004). Plusieurs conditions permettent cette réaction, y compris à l'air libre où

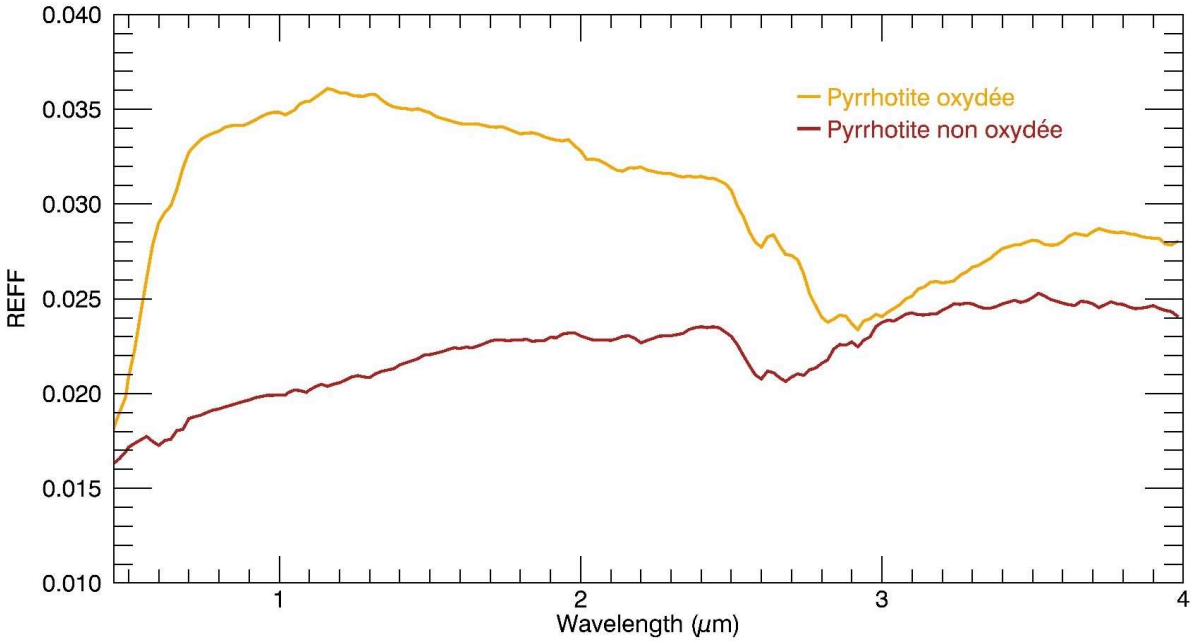


FIGURE 7.13 – Spectre en réflectance de deux échantillons de pyrrhotite broyés à des tailles micrométriques. L'échantillon du spectre orange a subi une oxydation conduisant à une modification importante de sa composition. L'échantillon est bien plus clair dans le visible (d'un aspect brun au lieu du noir de l'échantillon non oxydé) mais aussi dans l'infrarouge. Il exhibe par ailleurs une pente bleu à partir de 1.2 µm. On note enfin la modification des signatures à 2.7 - 2.9 µm.

un morceau de pyrite ou de pyrrhotite s'oxyde en quelques jours et se recouvre d'une couche composée d'ions sulfates et d'oxyde de fer (II). Les fines particules de sulfures de fer sont d'autant plus sensibles à l'oxydation en raison de leur petite taille, il est donc impératif d'être prudent lors des étapes de broyage. La meilleure solution est de stocker la pyrrhotite sous vide avec un dessicant. Lors du broyage d'un morceau de pyrrhotite, il a été constaté une réaction exothermique, symptomatique d'une oxydation. En plus de chaleur (suffisamment forte pour faire brunir un morceau de papier !), une très forte odeur s'est dégagée (suffisamment forte pour irriter les narines !) ainsi qu'un changement de couleur assez important, l'échantillon virant au orange/brun assez rapidement avant de revenir à une couleur plus sombre. Cette échantillon à pu être mis de côté et broyé – il n'a pas été constaté d'autre cas d'oxydation. Un spectre en réflectance a été mesuré ainsi qu'une analyse en DRX. Cette dernière confirme effectivement l'oxydation de la pyrrhotite avec une composition d'environ 46% de pyrrhotite, 38% de szomolnokite ($FeSO_4 \cdot H_{20}$, un produit d'altération des sulfures de fer), 13% de souffre élémentaire et enfin 3% de magnétite ($Fe^{2+}Fe_2{}^{3+}O_4$).

Caractéristiques spectrales La pyrrhotite possède une réflectance très faible (à l'état de poudre) et ne montre pas de signature particulière de 0.45 µm à 4.0 µm. D'une part, le souffre présente un spectre très plat sur cette gamme spectrale (Clark, 1999). D'autre part, les poudres de fer sont marquées par l'absence de bandes d'absorptions et par une pente rouge qui diminue à mesure que la taille des grains diminue, on le verra par la suite et c'est également ce que l'on retrouve par l'étude de météorites de fer (Cloutis et al., 2015). La combinaison de ces deux éléments dans notre poudre de pyrrhotite conduit alors à un spectre légèrement rouge, et ne possédant pas de bande d'absorption qui lui sont caractéristiques. Nos

deux échantillons de pyrrhotite, sous forme de grains très fins, seront décrits plus en détails par la suite, dans le chapitre 8.

L'impact de l'oxydation est nettement visible sur la mesure en réflectance comme le montre la figure 7.13. La pyrrhotite oxydée voit son niveau de réflectance dans le visible et l'infrarouge particulièrement augmenter par rapport à la pyrrhotite non oxydée. Sa pente spectrale, très rouge jusqu'à la fin du visible, devient bleu à partir de 1.2 µm. Enfin, la bande d'absorption à 2.7 µm, due à OH dans la vapeur d'eau, est moins visible pour l'échantillon oxydée, sans doute en raison de la signature à 2.9 µm plus prononcée.

7.3.3 Silicates

La présence de silicates dans les comètes est supposée depuis longtemps. Déjà en 1950, le modèle de Whipple (Whipple, 1950) illustre les comètes comme étant faite de glace et de « matériel météorique ». Bien qu'il ne puisse rentrer dans les détails en raison du manque de connaissance précises que l'on a à l'époque à propos de leur noyau (rappelons que la première image d'un noyau cométaire arrive en 1986), Whipple fait part de ces éléments constituant prétendument, avec les glaces, les comètes : fer, calcium, manganèse, magnésium, silicium, chrome, nickel, aluminium et sodium. Combiné avec l'oxygène, ces éléments rentrent dans la composition de nombreux silicates.

Leur détection sera facilitée par la suite grâce aux observations menées dans l'infrarouge (autour de 10 µm typiquement). Que ce soit par des observations menées au sol avec divers télescopes (IRTF, Gemini, Subaru (Wooden et al., 2004; Kelley and Wooden, 2009; Kelley et al., 2017)), par des télescopes spatiaux comme ISO (Crovisier et al., 1997) ou Spitzer (Lisse et al., 2006, 2007) ou encore par les sondes spatiales ayant survolées différents noyaux cométaires, Vega 1 et 2 ainsi que Giotto pour la comète 1P/Halley (Combes et al., 1985; Kissel et al., 1986a,b; Combes et al., 1986, 1988) notamment.

Encore une fois, les grains rapportés par la sonde Stardust font part de la présence de silicates (Zolensky et al., 2006; Brownlee et al., 2006; Keller et al., 2006). Ces silicates sont présents sous leurs formes amorphes et cristallines (Zolensky et al., 2008), notamment distingués par leur origine. Tandis que les silicates cristallins condensent à partir de températures élevées, au moins supérieures à 800K (Bockelée-Morvan et al., 2002) voire de l'ordre de 1200K-1400K (Hanner, 1999), les silicates amorphes se sont formés généralement dans le milieu interstellaire à partir de silicates cristallins bombardés par des ions mais aussi par refroidissement très rapide (Wooden, 2008).

Il est éventuellement possible, grâce à des modèles ajustant des spectres dans l'infrarouge (de 5 µm à 35 µm par exemple), d'estimer l'abondance de chaque espèce de silicates dans les observations des queues de poussières des comètes. Ces modèles permettent d'identifier un certains nombres d'espèces minérales (olivines, pyroxènes, phyllosilicates, sulfures...) ainsi que leur phase pour l'olivine et les pyroxènes ou encore les glaces d'eau et de dioxyde de carbone ou même le carbone amorphe. C'est typiquement le cas des études de Lisse et al. (2006) et Lisse et al. (2007) pour ne citer qu'elles. Cependant, il est important de noter que ces modèles ne prétendent pas révéler la composition exacte des poussières cométaires. Leurs résultats sont fiables dans les grandes lignes pour les minéraux et les phases les plus simples et

dont les signatures spectrales sont suffisamment connues et résolues dans les spectres utilisés. Le plus souvent il s'agit donc de l'olivine et du pyroxène.

Dans notre étude, où de nombreux paramètres entrent en jeu (taille des grains, composés multiples, type de mélange et structure), il est difficile d'étudier la contribution et les différentes possibilités. Il est donc préférable de se concentrer sur chaque paramètre de façon individuelle lorsque cela est possible, et ce afin de mieux en étudier les effets, plutôt que de multiplier les matériaux. C'est cette approche qui a été privilégiée ici où l'on teste un type de roche, la dunite.

La dunite est composée principalement d'olivine dont la formule générale est $(\mathrm{Fe}_x\mathrm{Mg}_{1-x})_2\mathrm{SiO}_4$ où $0 \leq x \leq 1$. Celles-ci se divisent en deux pôles représentés par la fayalite – pôle ferreux, de formule$\mathrm{Fe}_2\mathrm{SiO}_5$ – et la forstérite – pôle magnésien, de formule $\mathrm{Mg}_2\mathrm{SiO}_4$.

7.3.3.1 Dunite

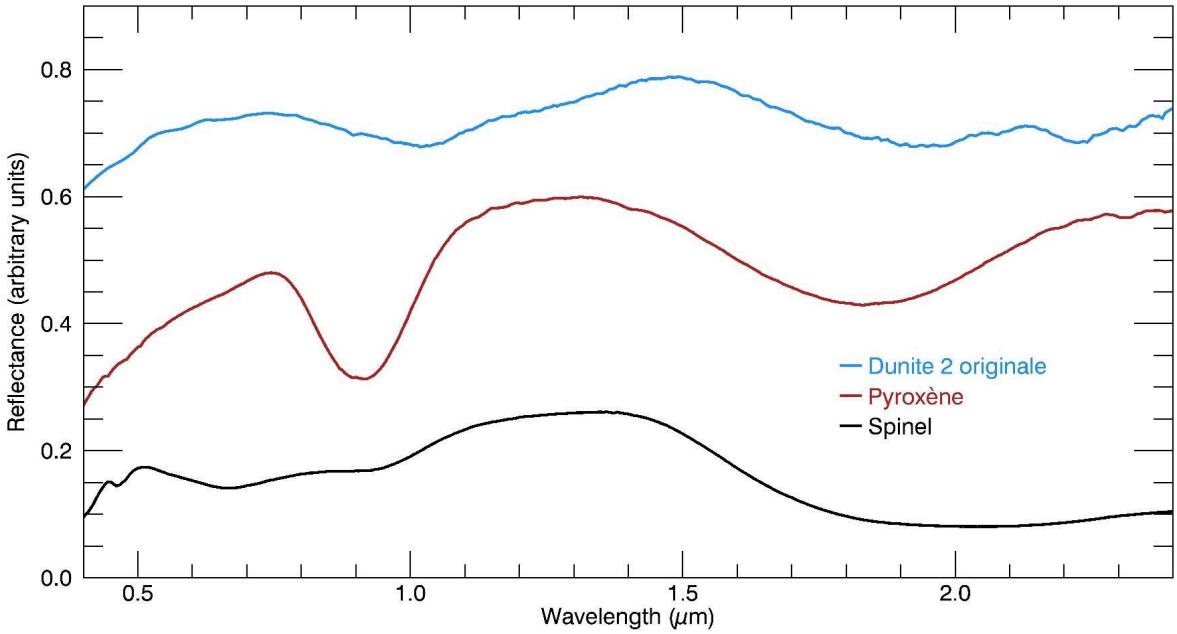
Généralités Deux échantillons de dunites ont été utilisés dans notre étude. Le premier n'a malheureusement pas pu être caractérisé et sa composition exacte comme son origine restent donc inconnues. Cet échantillon est désigné en tant que « dunite 1 ». Deux échantillons de dunite 1 sont disponibles : le premier est broyé à des tailles de grains autour de 5 µm et le deuxième au broyeur planétaire.

Le deuxième échantillon de dunite, appelé « dunite 2 », a été fourni par Olivier Poch (Université de Bern et Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble) sous forme de poudre ≤80 µm (voir figure 7.14). Il provient d'une ophiolite d'Oman dont la composition est estimée être à 95% de l'olivine et à 5% des inclusions de spinelle $(\mathrm{MgAl}_2\mathrm{O}_4)$ et de phlogopite $(\mathrm{KMg}_3(\mathrm{Si}_3\mathrm{Al})\mathrm{O}_{10}(\mathrm{OH})_2)$. Pour cette dunite, environ 80% de l'olivine est de la forsterite, amenant à la formule $(Fe_{0.2}Mg_{0.8})_2SiO_4$.

Caractéristiques spectrales Les spectres des deux dunites broyées au planétaire sont présentés dans la figure 7.11, spectres A et B, tandis que le spectre et des photos de la dunite 2 sont visibles dans la figure 7.14. Les ressemblances entre les dunites 1 et 2 d'un point de vue des signatures spectrales, bandes d'absorptions et pentes spectrales semblent indiquer que la dunite 1, bien que non caractérisée, est sans doute de composition proche de la dunite 2, à savoir riche en forstérite. La différence de réflectance pouvant être relative à la taille des grains comme il sera discuté par la suite, ce paramètre ne sera pas discuté ici. La large bande d'absorption visible entre 1.6 et 2.1 µm (voire au-delà) dans ces deux échantillons de dunites et dans le spectre original de la dunite 2 est due à la présence de spinelle (figure 7.14) qui ont été effectivement détectée.

Une bande bien caractérisée, et largement discutée dans la littérature (Burns, 1970; Roger G. Burns, 1972; Adams, 1974, 1975; Hunt, 1977; King and Ridley, 1987; Clark, 1999), est celle de l'ion Fe^{2+} qui se manifeste dans nombre de minéraux. Dans l'olivine, elle est se situe autour de 1.04 µm - 1.08 µm mais cache en réalité une nature plus complexe puisque cette première absorption se conjugue avec deux autres bandes moins intenses et situées de chaque côté, à 0.9 µm et 1.25 µm (Burns, 1970; King and Ridley, 1987; Ody, 2012). De plus, sa position et son intensité, c'est à dire sa profondeur, varient selon la teneur

(a) Photos binoculaires de la dunite 2 telle que fournie.



(b) Spectre de la dunite 2 originale comparée à un spectre de spinelle et d'un mélange de pyroxènes.

FIGURE 7.14 – Spectre et photos de la dunite 2, fournie à l'état de poudre < 80 µm. Le triplet de bandes d'absorptions de l'ion ferreux est peu visible ici où ne distingue que la large bande à 1.04 µm. Les données pour ce spectre ont été fournie par Olivier Poch (Université de Bern). Les spectres de spinelle et de pyroxène viennent de la librairie spectrale du PDS (échantillon SP-EAC-019 et PX-EAC-009).

en fer. La bande est plus profonde et se décale vers les grandes longueurs d'onde à mesure que la teneur en fer augmente. Cependant, cette augmentation s'accompagne d'une diminution du continuum et lorsque l'olivine s'approche du pôle de la fayalite (riche en fer), la bande d'absorption sature et sera donc moins profonde qu'une olivine proche du pôle de la forstérite (Ody, 2012) (voir figure 9.4 page 198). La faible bande d'absorption située à 1.05 µm dans les spectres A et B de la figure 7.11 confirme la composition majoritairement forstéritique de l'olivine présent dans cette dunite. Cependant, même avec une forte teneur en forsterite, cette bande d'absorption, caractéristique des olivines, semble anormalement faible. On verra dans la discussion (section 9.2.1 page 197) que la taille des grains peut jouer sur son contraste de même qu'elle peut expliquer la pente bleu de nos échantillons broyés finement, pente qui n'est pas visible dans l'échantillon original dont la taille est inférieure à 80 µm (figure 7.14).

Échantillons	Espèces	Composition chimique
Charbon	PSOC 1532	$C_{70.62}H_{5.32}N_{0.94}O_{23.12}$
Sulfure de fer	Pyrrhotite	$Fe_{1-x}S$ avec $0 < x < 0.20$
Silicates	Dunite 1	Riche en forstérite
	Dunite 2 (95% olivine)	$\sim(Fe_{0.2}Mg_{0.8})_2SiO_4$

TABLE 7.1 – Compositions des échantillons sélectionnés pour l'étude. Seul le composant majoritaire est donné pour les dunites.

7.4 Préparation des échantillons

La préparation des échantillons est un processus à la fois long, parfois fastidieux, mais aussi et surtout primordial. Nous allons voir dans cette section comment les matériaux qui ont été présentés précédemment ont été préparés : à savoir broyés, puis mélangés entre eux. Un aperçu de ces échantillons sera également donné à travers des images réalisées au microscope électronique à balayage.

7.4.1 Nouveautés de l'approche dans la production des poudres : le broyage planétaire

La méthode employée pour broyer les matériaux mérite une attention particulière en raison de ses spécificités et des petites tailles qu'elle permet d'atteindre. La taille du régolithe présent à la surface d'un noyau de comète est supposément très fin, de l'ordre du nanomètre au micromètre. Un des enjeux est donc d'obtenir des matériaux à l'état d'une poudre ayant la même finesse. En effet, on rappelle que les poussières cométaires collectées par la sonde Stardust par exemple, ou encore que les matériaux supposés d'origines cométaires comme les IDPs ou certaines micrométéorites comme les UCAMMs (voir figure 7.15), ont des tailles de l'ordre du micromètre, avec des composants atteignant parfois quelques dizaines de nanomètres (Brownlee et al., 2006; Zolensky et al., 2006; Engrand et al., 2007; Dobrica et al., 2012; Engrand et al., 2016; Fulle et al., 2017). Les instruments dédiés à l'étude des poussières à bord de la sonde Rosetta ont également permis d'apporter de nouveaux indices sur la structure et la taille de la poussière cométaire. MIDAS, COSIMA et GIADA détectent ainsi des poussières allant de quelques centaines de nanomètres à plusieurs centaines de micromètre (Bentley et al., 2016; Mannel et al., 2016; Rotundi et al., 2015; Della Corte et al., 2016; Langevin et al., 2016; Merouane et al., 2016) (voir figure 7.16). Il est cependant important de garder à l'esprit que ces grains sont prélevés in-situ (c'est-à-dire dans la coma) et qu'il est donc nécessaire de faire l'hypothèse qu'ils sont représentatifs de ce que l'on trouve en surface, aussi bien du point de vue de la distribution en taille que de la structure de la poussière.

Les broyeurs classiques (tel un vibro-broyeur, figure 7.17a) ne permettent pas d'atteindre de telles tailles. Du fait des limitations techniques de l'appareil, celles-ci ne sont pas plus petites que 10µm. Un nouveau type de broyeur, acquis par l'IPAG à cette occasion, a donc été utilisé. Il s'agit d'une broyeur à billes, dit « planétaire » (broyeur planétaire à billes, figure 7.17b). En effet, son principe repose sur la rotation dans le sens des aiguilles d'une montre d'une roue « solaire », horizontale, sur laquelle repose en périphérie

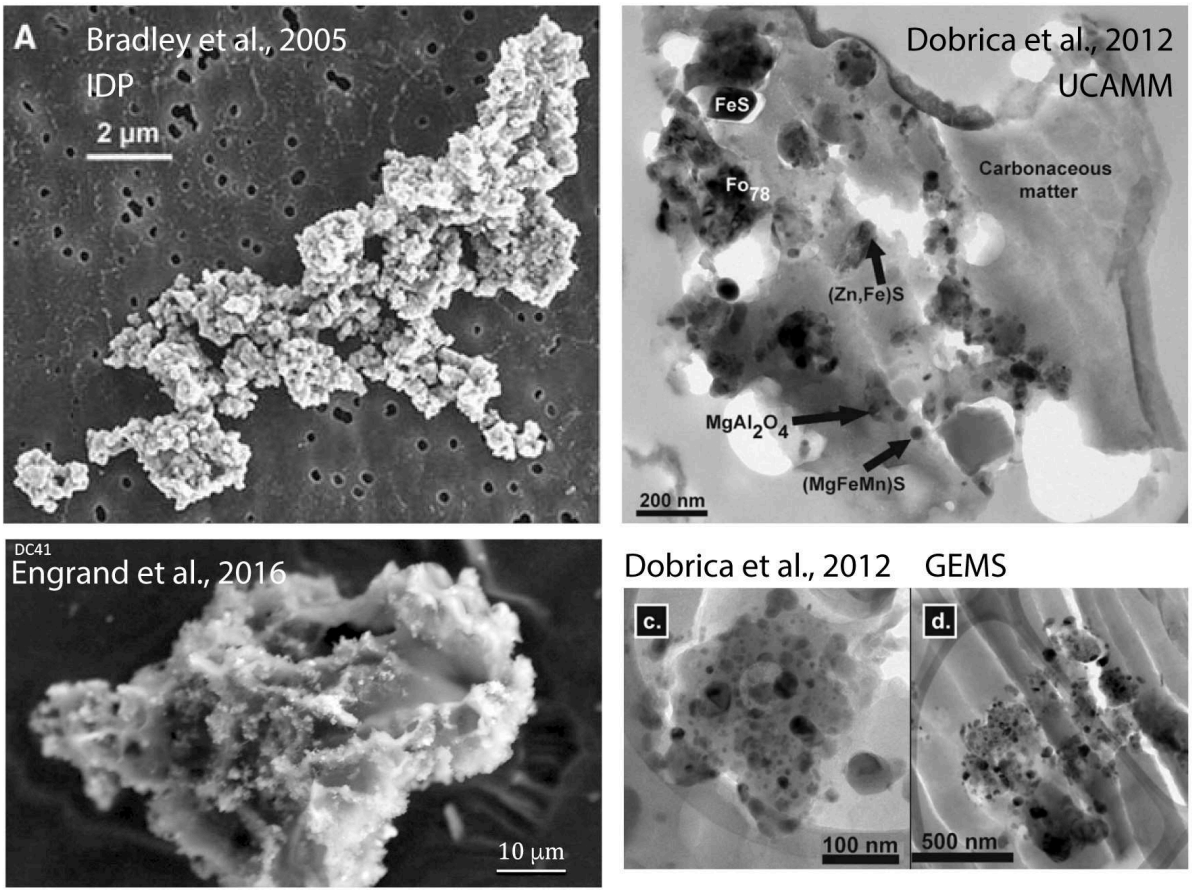


FIGURE 7.15 – Exemples d'analogues en taille, en composition ou en structure de poussières cométaires et/ou des poudres produites dans cette étude. En haut à gauche : image au MEB d'une IDP chondritique (Bradley et al., 2005). En bas à gauche : UCAMM supposé d'origine cométaire (Engrand et al., 2016). En haut à droite : UCAMM dont la taille est semblable à nos particules et contenant des sulfures de fer et l'olivine notamment (Dobrica et al., 2012). En bas à droite : GEMS contenu dans des UCAMMS. Le tout est contenu dans une matrice carbonée et les éléments noirs au centre sont des sulfures de fer de tailles nanométriques pris dans une matrice de verre riche en Mg et Si.

un bol de broyage. Ce bol de broyage, remplie de matière, de billes de broyage, et éventuellement d'un liquide, tourne lui dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. La force centrifuge exercée par les rotations de la roue principale et du bol poussent les billes sur les parois du bol tout en les entrainant dans un mouvement de rotation autour de l'axe central de celui-ci, elles écrasent ainsi par friction le matériau disposé à l'intérieur. Un broyage colloïdal, c'est à dire en présence d'un liquide, permet de renforcer l'efficacité du processus et surtout d'atteindre des tailles de particules finales plus petites, de l'ordre de 0.1 µm d'après la fiche technique, nous verrons par la suite que des particules plus petites sont tout de même produites.

Un protocole de broyage a dû être mis en place étant donnée la nature exploratoire de ce travail, le broyeur planétaire ayant été reçu à mon arrivée, lors du premier séjour (sur trois) à l'IPAG. Pour atteindre les granulométries souhaitées, il a été nécessaire de tester plusieurs méthodes. Notamment, obtenir des particules très petites n'est pas une chose aisée car malgré les recommandations du constructeur, le broyage est extrêmement dépendant du matériau : de sa ductilité d'une part, de la taille des billes – des billes de

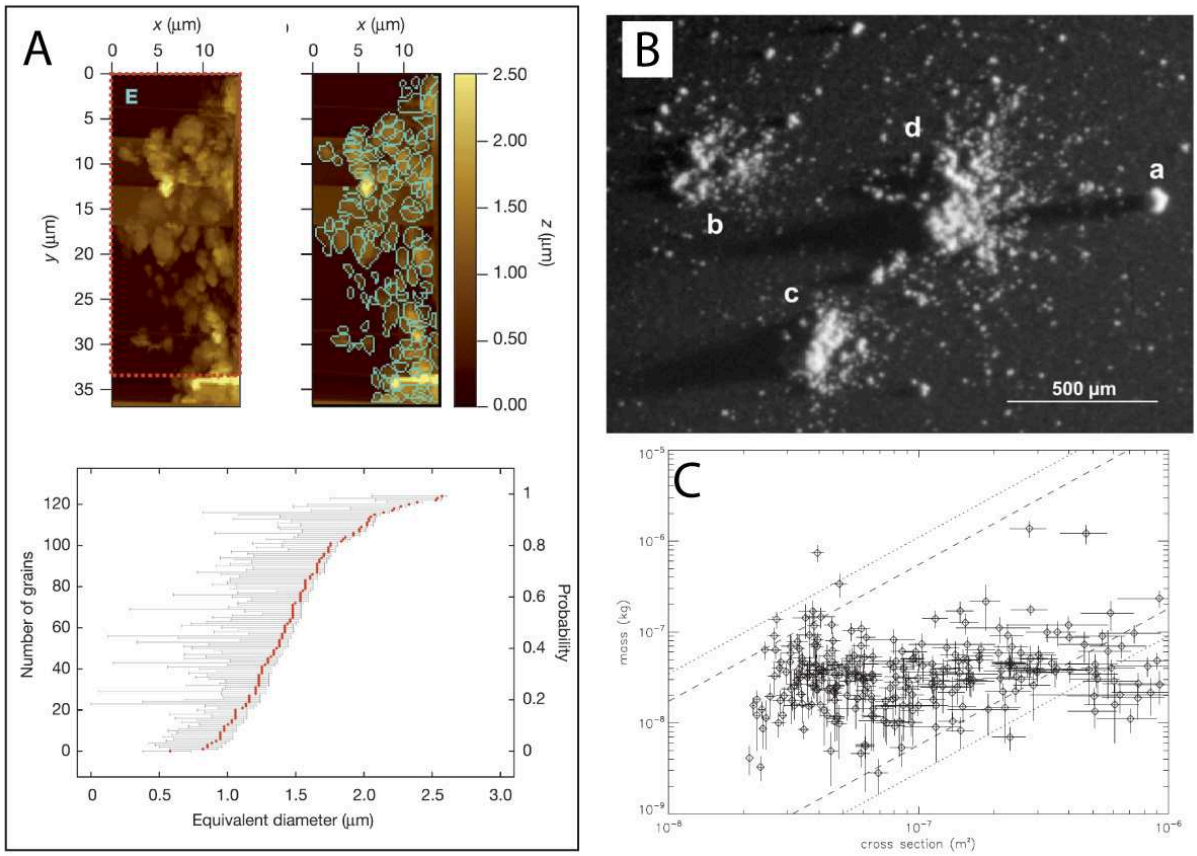
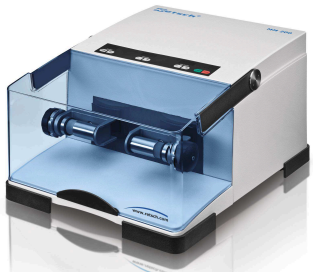


FIGURE 7.16 – Panneau A : mesure MIDAS de grains capturés dans la coma de 67P de quelques microns seulement (Bentley et al., 2016; Mannel et al., 2016). B : image des quatre types de particules identifiées par Langevin et al. (2016) parmi les milliers de particules collectées par COSIMA. En (a) une particule compacte ; en (b) un *« shattered cluster »*, c'est à dire un agrégat s'étant effrité lors de l'impact ; en (c) un *« glued cluster »*, un agrégat qui ne s'est pas abimé sur la cible et dont la structure est relativement bien définie ; enfin en (d) un *« rubble pie »*, soit un groupe de particules dont les constituants sont plus petits que l'ensemble et pas toujours bien défini. Le lecteur est renvoyé vers Langevin et al. (2016) pour plus de détails. Le graphique C issue de Fulle et al. (2017) donne la masse et une estimation de la taille des grains cométaires collectés par l'instrument GIADA.

diamètres 0.5 mm et 2 mm étaient disponible – mais aussi de la proportion billes/liquide/matériau introduite dans le bol d'autre part ; enfin, cela dépend énormément de la taille du matériau avant le broyage.

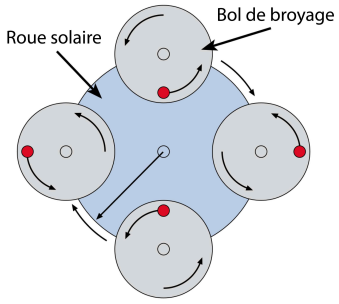
Par exemple, avec le bol de broyage disponible de 50 ml, la granulométrie maximale alimentée doit être inférieure à 3 mm, ce qui reste encore très grossier. De manière générale, pour atteindre de petits diamètres de particules il est nécessaire de procéder à un broyage dit colloïdal, c'est à dire avec un solvant. Il est également important d'introduire dans le bol un matériau déjà fin, de l'ordre de 25 µm typiquement. Le temps de broyage lui est un paramètre difficile à contraindre. L'efficacité d'un broyeur planétaire est telle qu'il est censé être court (de l'ordre de quelques heures). Cependant, par manque de temps, les tests systématiques dédiés à une étude de ce type n'ont pas pu être menés dans les conditions réelles d'utilisation. Cela reste un point intéressant à traiter.

Le protocole décrit par le schéma 7.18 permet d'atteindre des tailles de particules très petites, avec une distribution qui va de l'ordre de quelques dizaines de nanomètres jusqu'à 25 µm environ. Cependant, il



(a) Vibro-broyeur « classique » Retsch MM200.

(b) Broyeur planétaire à billes Retsch PM100.



(c) Illustration du fonctionnement de la roue solaire du broyeur planétaire.

FIGURE 7.17 – Broyeurs et principe de fonctionnement.

n'est pas unique et a été testé et utilisé avec les matériaux décrits précédemment. Il est donc important de noter qu'avec d'autres matériaux il est possible que les résultats obtenus soient différents. Plus de détails sont données sur ce protocole en annexe 9.5.3 page 326. Ce protocole de préparation de poudre a été suivi pour une partie des échantillons. Nous verrons par la suite que dans certains cas des variantes ont été utilisées, notamment concernant la phase de pré-broyage planétaire et de tamisage avant et après le broyage. Ces étapes revêtent une grande importance s'agissant de la taille finale des grains et par conséquent sur le type de mélange que l'on peut obtenir. Or, nous allons justement voir que le type de mélange obtenu, à savoir la façon dont les grains/particules sont agencés/structurés/organisés les uns par rapport aux autres, a un impact important sur le spectre de réflectance d'un mélange.

7.4.2 Mélanges des différentes poudres

L'influence spectrale du type de mélange réalisé entre deux matériaux sur le spectre est connue depuis longtemps. Un bref rappel est donné ici tel que l'on peut en trouver dans Clark (1999) par exemple.
On distingue quatre types de mélange la plupart du temps :

1. **Mélange spatial** (« *linear or areal mixture* ») : un mélange est dit spatial lorsque ses composés sont optiquement distincts, c'est à dire que les photons arrivant à la surface interagiront pour la plupart avec un seul des matériaux présents. La réflectance finale d'un tel mélange correspond à la combinaison linéaire de toutes les contributions apportées par chaque fraction d'aire occupée par chacun des matériaux. Si des matériaux A et B de réflectances r_A et r_B occupent des fractions f_A et f_B de leur aires totales respectives dans le champ de vue, alors la réflectance finale r sera : $r = f_A r_A + f_B r_B$. Ce type de mélange correspond à l'exemple de gauche sur la photo 7.20.
2. **Mélange intime** : dans un mélange intime, les composés sont très proches les uns des autres, ils sont en contact direct. Les photons arrivant à la surface sur un des deux matériaux peuvent alors être diffusés vers le deuxième matériau, ce qui n'est pas le cas dans le mélange spatial. Il en résulte une réflectance totale qui n'est pas une simple combinaison linéaire comme précédemment. Tout

FIGURE 7.18 – Protocole pour le broyage planétaire.

dépend alors des propriétés optiques des matériaux utilisés. Ce type de mélange correspond à la photo du milieu dans la figure 7.20.

3. **Enrobage ou mélange en couche** (« *coating* ») : un mélange en couche, ou l'effet d'enrobage, se réfère à un mélange dans lequel un des matériaux enrobe l'autre. Un cas concret est présenté sur la photo de droite sur la figure 7.20. On peut y voir un agrégat de PSOC 1532 (marron clair), recouvert sur la droite par de la pyrrhotite (noir). L'agrégat en question a été cassé afin de pouvoir distinguer l'intérieur. Lorsqu'il n'est pas cassé, seule la pyrrhotite est visible. Cela amène à penser que selon les cas, en fonction des propriétés optiques du matériau qui recouvre et qui constitue les agrégats, la réflectance d'un mélange constitué de tel agrégats enrobés ne sera pas non plus une combinaison linéaire. En effet, les photons peuvent tout autant être absorbés par le premier matériau recouvrant qu'être diffusés vers le deuxième s'ils traversent la couche supérieure. Il faut aussi garder à l'esprit que la longueur d'onde de la lumière incidente et la taille des grains des matériaux aura une incidence sur la pénétration des photons dans les matériaux. Enfin, il est également possible que le matériau sous-jacent, soit en partie directement exposé. Attention à la différence entre l'enrobage et le mélange en couche. Si dans les deux cas un matériau en recouvre un autre, un mélange en couche peut représenter une stratification par exemple, tandis que l'enrobage auquel il est fait référence ici prend place à l'échelle d'un grain ou agrégat d'une centaine ou de quelques centaines de microns typiquement.
4. **Mélange moléculaire** : dans un mélange moléculaire, non illustré ici, les constituants sont mélangés ou en contact à l'échelle de leurs molécules. C'est le cas entre deux liquides, entre un liquide et un solide ou éventuellement entre deux solides (des glaces par exemple). C'est typiquement le cas de l'eau adsorbée sur un minéral ou de l'essence sur le sol. Ce genre de phénomènes peut provoquer des décalages de bandes d'absorptions (Clark, 1999).

Les spectres de réflectance de la figure 7.19 illustrent les différences entre un mélange spatial et un mélange intime réalisés à partir d'alunite ($KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$) et de jarosite ($KFe_3{}^{3+}(SO_4)_2(OH)_6$). De manière générale, les matériaux sombres auront tendance à dominer le spectre d'un mélange intime, particulièrement aux plus petites longueurs d'onde. C'est le cas entre 0.4 µm et 1.4 µm dans cet exemple ou le spectre du mélange intime est presque identique à celui de la jarosite. En revanche le mélange spatial est lui intermédiaire entre l'alunite et la jarosite.

7.4.3 Contrôle de la taille de grains et du type de mélange par imagerie

Afin de connaitre la taille des particules qui constituent les poudres produites il est nécessaire d'effectuer un contrôle sur nos échantillons, ce paramètre n'étant pas estimable à l'œil nu. Après un test de caractérisation par granulométrie LASER n'ayant pas donné de bons résultats, c'est l'imagerie au MEB (Microscope à Balayage Électronique) qui a permis l'obtention d'images avec lesquelles les tailles ont pu être estimées. Cette caractérisation au MEB a été réalisée au laboratoire 3SR de l'Université de Grenoble-Alpes avec un ZEISS FEG Ultra 55.

Pour caractériser la centaine d'échantillons élaborés une fois mélangés et analysés, une étude détaillée et des images à la loupe binoculaire ont été faites pour les plus important d'entre eux. Les photos ayant

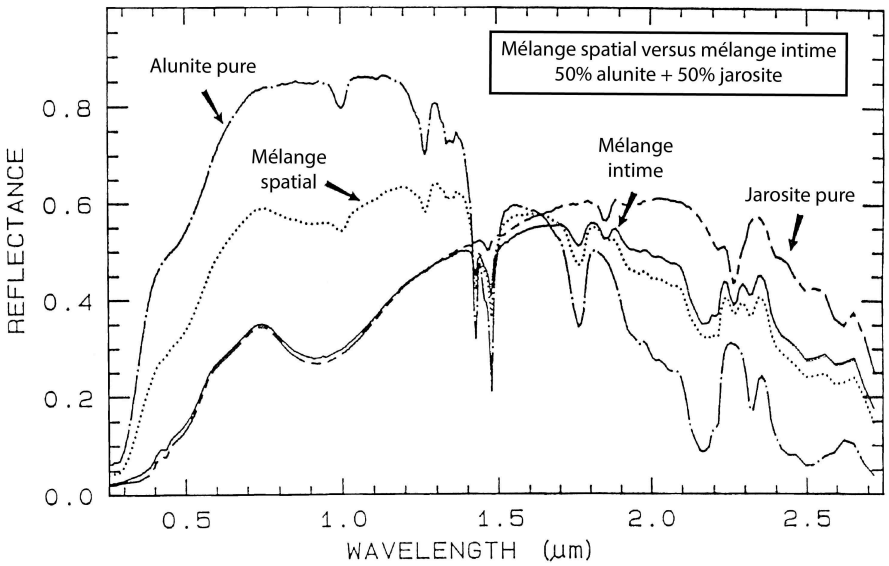


FIGURE 7.19 – Spectres de réflectance illustrant l'impact du type de mélange entre deux minéraux : l'alunite ($KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$) et la jarosite ($KFe_3{}^{3+}(SO_4)_2(OH)_6$). Figure issue et adaptée de Clark (1999).

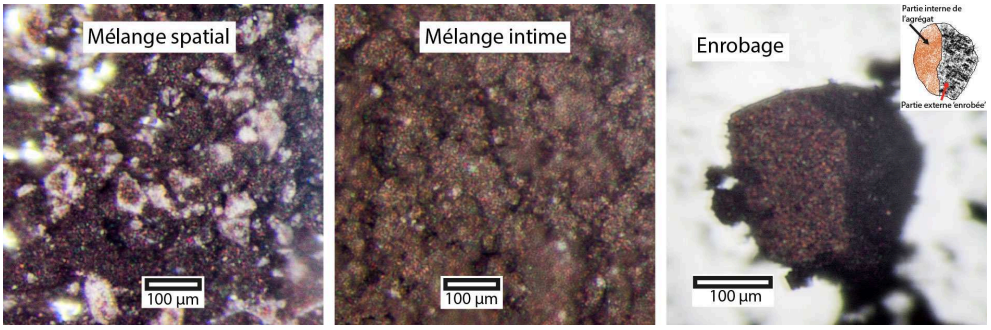


FIGURE 7.20 – Différents types de mélange entre deux composés. A gauche un mélange dit spatial, entre du charbon PSOC 1532 et de la dunite. Au milieu un mélange intime entre ces mêmes matériaux. A droite, c'est l'effet de l'enrobage de la pyrrhotite sur un agrégat de PSOC 1532 qui est observé. Ici, un seul agrégat est présent et a été cassé en deux volontairement pour rendre visible le charbon. Il est cependant possible d'imaginer une surface recouverte de tels agrégats.

un intérêt particulier seront présentées avec les résultats. La figure 7.20 illustre par ailleurs les différents types de mélanges que l'on peut obtenir et leurs aspects visuels tels qu'on les observe à la binoculaire.

L'utilisation d'un MEB a permis de valider la technique du broyage planétaire pour l'obtention de taille de particules typiquement inférieures au micron. Des poudres issues de différents protocoles de broyage ont ainsi été comparées. Les figures 7.21 et 7.22 présentent sur chaque colonne un des matériaux présentés précédemment.

PSOC 1532 1532 L'image A de la figure illustre un échantillon de PSOC 1532 tel qu'il se présente sous sa forme initiale, non broyé mais tamisé en dessous de 200 µm. On y voit des morceaux grossiers et surtout très anguleux. Après un broyage « classique », c'est à dire avec le vibro-broyeur, on retrouve ces morceaux dont la taille atteint plusieurs dizaines de microns encore, bien que quelques fragments soient plus petits. On obtient une poudre présentant des morceaux de PSOC 1532 n'ayant pas été broyés mais simplement cassés comme le montrent les arêtes

anguleuses des morceaux des photos B et C.

La deuxième colonne présente un échantillon de PSOC 1532 après un broyage réalisé au broyeur planétaire à billes pendant trois heures. Contrairement au protocole standard présenté dans le schéma 7.18, l'échantillon n'a pas été tamisé à 25 µm après le broyage mais simplement à 200 µm avant le broyage. La photo D illustre bien ce détail puisque des morceaux de quelques dizaines de microns sont visibles. En revanche, contrairement aux photos A, B et C, ceux-ci semblent recouverts de plus petits éléments. À une échelle plus petite, photo E, on peut en effet observer que de très petites particules sont présentes, de l'ordre de quelques microns voir inférieure. Enfin, sur la photo F, réalisée sur un autre échantillon mais avec un grossissement plus important encore, on voit qu'un broyage planétaire nous permet d'atteindre des tailles de l'ordre de la centaine de nanomètres et même moindre.

Pyrrhotite Les photos G, H, I de la figure 7.22 concernent la pyrrhotite. Cet échantillon a subi un tamisage à 200 µm puis un broyage planétaire. Sur la photo G est visible un morceau de pyrrhotite, relativement gros, sans doute non broyé, mais recouvert par des éléments plus fins. Un grossissement plus important révèle des détails plus fins, avec des particules inférieures au micron (photo H). Sur la photo I, avec une échelle de 200 nm, on peut également distinguer de très petites particules d'une centaine de microns voire de quelques dizaines de nanomètres.

Dunite Parmi les silicates étudiés, seule la dunite a été imagée lors d'une expérience destinée à des fins de test avec le vendeur et précédant l'acquisition du broyeur planétaire par l'IPAG donc. Cette dunite a été broyée durant 1h30 puis tamisée à 25 µm, la distribution en taille y est donc plus homogène contrairement aux échantillons de PSOC 1532 et de pyrrhotite précédemment présentés. L'échelle atteinte est également très basse puisque les plus fines particules atteignent des tailles tournant autour de la centaine de nanomètres.

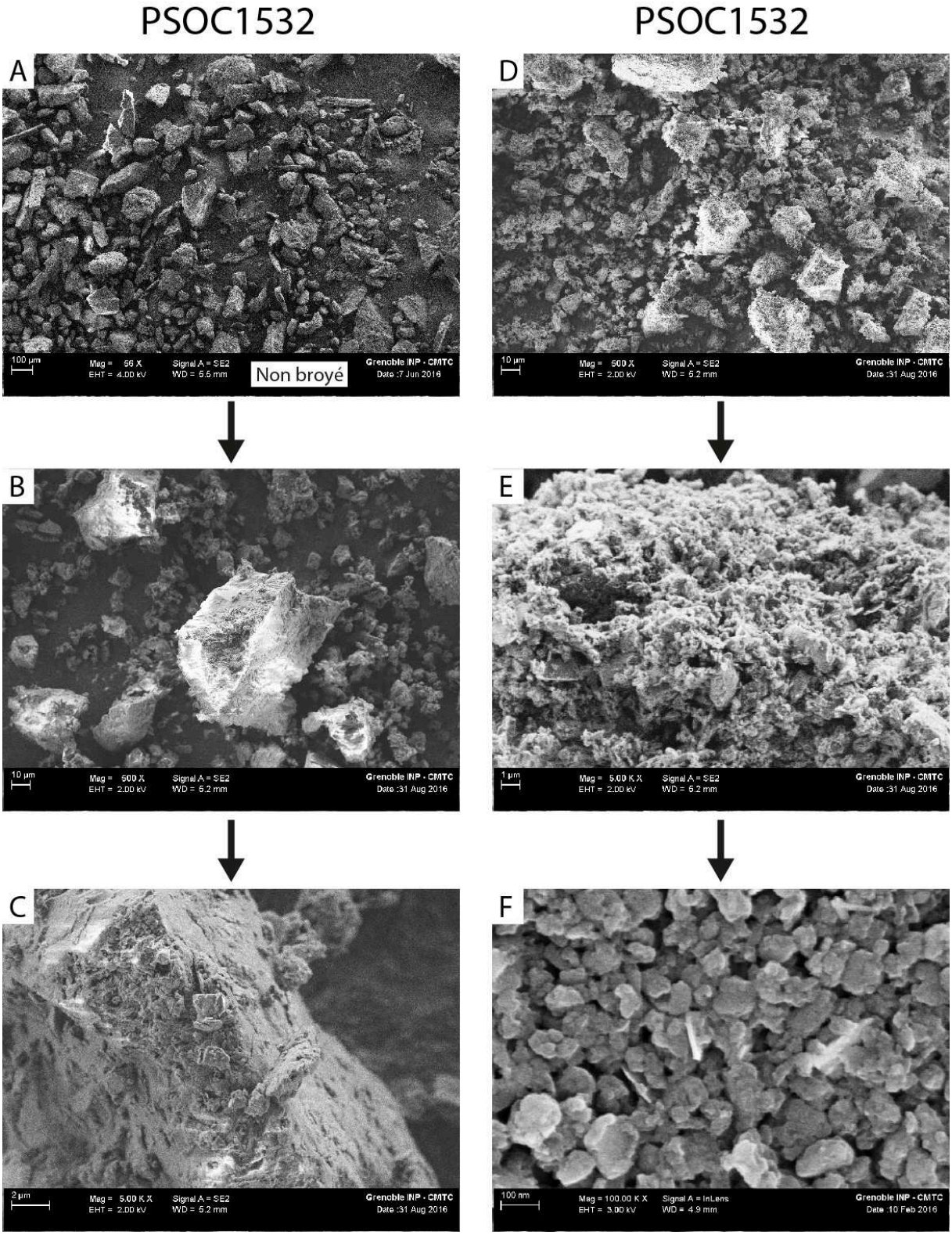


FIGURE 7.21 – Photographies MEB de PSOC 1532.

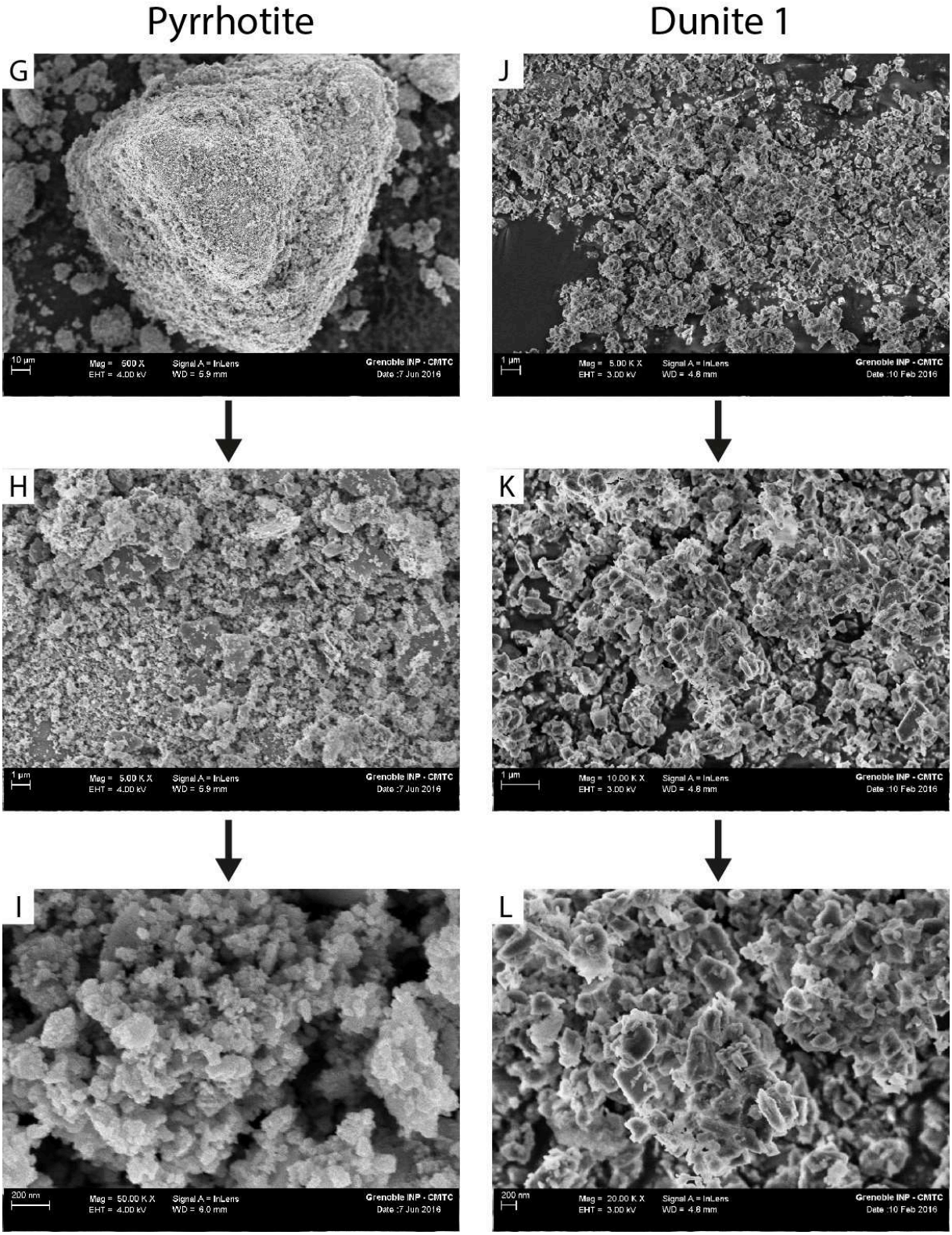


FIGURE 7.22 – Photographies MEB de pyrrhotite et de dunite.

Chapitre 8

Résultats des mesures de réflectance sur les poudres d'analogues cométaires

Afin d'essayer de se rapprocher au maximum des observations VIRTIS, illustrées par la figure 7.6 dans cette partie, plusieurs mélanges ont été réalisés entre les matériaux précédemment évoqués : PSOC 15321532, pyrrhotite, silicates (principalement dunite). Plus d'une centaine de mélanges et de mesures de réflectance ont permis de tester les effets de différents paramètres qui caractérisent un mélange entre deux composés. La taille des grains, la composition ou encore le type de mélange sont les principaux qui seront discutés dans la section 9, suite à la présentation des résultats ci-dessous.

Les spectres de réflectance des poudres de PSOC 1532, de pyrrhotite et de silicates ainsi que leurs mélanges sont présentés dans cette section. La gamme spectrale couvre les longueurs d'onde allant de 0.45 µm à 2.7 µm et la géométrie d'acquisition est fixe : l'angle d'incidence est de 0°, celui d'émergence de 30°, l'azimuth est de 0°.

Dans un premier temps les phases pures sont présentées (8.1), suivies des mélanges entre deux composés (8.2), puis trois (8.3). Dans ces deux derniers cas, l'accent est mis sur des mélanges contenant des tailles de grains sub-micrométriques. Enfin, la sous-section 8.4 présente des spectres de mélange pour des poudres contenant des tailles de grains variées.

8.1 Phases pures

L'impact de la taille des grains sur des échantillons de PSOC 1532 et de pyrrhotite a été testé grâce à des mesures en réflectance. Les études caractérisant le comportement spectral de ces matériaux (ou similaires) à des tailles supérieures au micromètre sont rares (Britt et al., 1992; Cloutis, 2003; Quirico et al., 2016). Elles sont à ma connaissance inexistantes pour des tailles sub-micrométriques telles que produites grâce à la technique du broyage planétaire. Cette étude a été possible grâce à l'état (macroscopique) initiale des échantillons de PSOC 1532 et de pyrrhotite. Il a ainsi été possible de tester différentes tailles de

grains et différentes techniques de broyage (à la main, au broyeur planétaire). Pour la dunite, fournie à l'état de poudre, il n'a pas été possible de tester en détails son comportement spectral en fonction de la taille des grains en partant de taille supérieure au micromètre. Cependant, des études existent déjà à ce sujet (par exemple : Adams and Filice (1967); Clark (1999)). On s'attache donc ci-dessous à présenter les spectres et les échantillons de PSOC 1532 et de pyrrhotite qui ont été produits à des tailles diverses ou selon des protocoles différents. L'interprétation en sera discutée dans la section 9.

8.1.1 PSOC 1532

Le PSOC 1532 broyé à la main et tamisé selon différentes tailles a été étudié par Quirico et al. (2016). Cette étude indique un comportement spectral similaire aux silicates, en l'occurrence la réflectance augmente lorsque la taille des grains de l'échantillon diminue (spectres continus de la figure 8.1). La limite du broyage manuel réside dans la difficulté, voire l'impossibilité, à atteindre des tailles très petites, de l'ordre du micromètre et inférieures. C'est particulièrement le cas pour le charbon qui est un matériau assez mou. De telles tailles sont atteintes grâce à la technique du broyage planétaire (voir section 7.4.1). La réflectance des échantillons de tailles proches ou inférieures au micromètre (spectres discontinus, figure 8.1) est plus élevée encore que la fraction < 25 µm issue d'un broyage à la main.

Dans le cas des échantillons broyés avec le broyeur planétaire, deux cas sont à distinguer. L'échantillon du spectre A est issu d'un broyage planétaire de 180 minutes puis écrasé doucement au mortier après séchage. L'échantillon du spectre B est quant à lui passé uniquement au mélangeur mécanique (sans la bille) après séchage, préservant les agrégats formés lors du séchage (voir schéma 7.18). Il en résulte une réflectance intermédiaire (~0.43 à 1.5 µm) entre le dernier échantillon de la série broyée manuellement (~0.34 à 1.5 µm) et l'échantillon A décrit précédemment (0.51 à 1.5 µm).

Les photos des mélanges A et B sont présentées figure 8.3. L'échantillon A présente une structure bien plus aérée que l'échantillon B. Les grains, bien que partiellement « collés » entre eux, ne sont pas agglomérés et sont indépendants les uns des autres. En passant une pincette de microscopie au travers il est possible de les séparer. Dans l'échantillon B, ce type de grains est aussi présent. En revanche, une grande majorité de la matière est agglomérée sous forme d'agrégats peu compacts. Il est possible de casser ces agrégats par une légère pression avec une pincette, on constate qu'ils sont effectivement faits de grains sub-micrométriques et qu'ils sont par ailleurs fragiles.

La figure 8.2 présente les principaux spectres du charbon PSOC 1532 utilisé dans les mélanges. Elle reprend les deux spectres A et B de la figure 8.1 (échantillon de PSOC 1532, broyage planétaire avec et sans agrégats) et les compare à deux autres échantillons de PSOC 1532.

Le spectre C possède une réflectance très faible (0.10 à 1.5 µm), similaire au spectre D. On remarque également que les bandes d'absorptions et la pente spectrale entre 1.0 µm et 2.0 µm sont moins contrastées et moins rouge respectivement. Cet échantillon a été broyé 180 minutes à partir du PSOC 1532 'original' (voir la description ci-dessous) et n'a subi de tamisage ni avant ni après le broyage planétaire. Bien que possédant plus de particules fines, de l'ordre du micromètre et inférieur, que l'échantillon original, on constate que des grains non broyés sont présent à l'intérieur (flèche rouge figure 8.3). N'ayant pas été

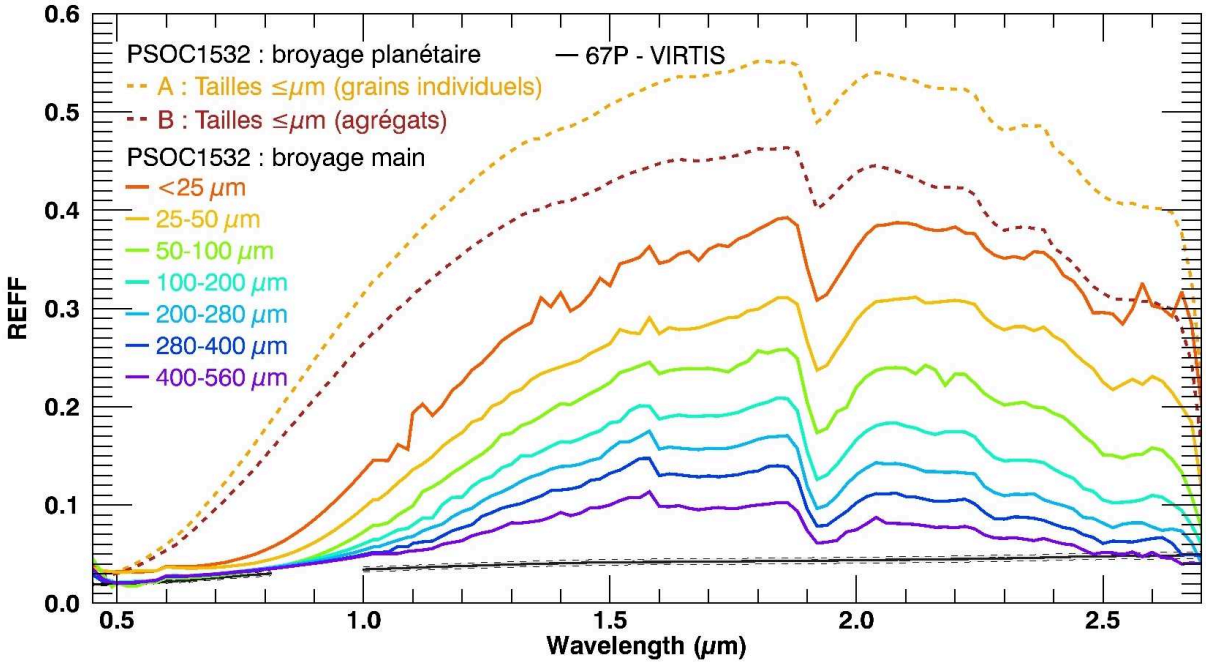


FIGURE 8.1 – Spectres en réflectance de PSOC 1532 : broyé avec le broyeur planétaire (spectres A et B, cette étude) et à la main dans un mortier puis tamisé selon plusieurs tailles (d'après Quirico et al. (2016)). Plus la taille de grains diminue, plus la réflectance augmente. Concernant les poudres broyées au broyeur planétaire, l'échantillon du spectre en haut (grains individuels) ne contient pas d'agrégats contrairement à l'échantillon B.

concassé au mortier, il possède également des agrégats (flèche jaune même figure). Une image MEB de cet échantillon est aussi visible figure 7.21.

Le spectre D est celui de l'échantillon original, n'ayant pas subi de broyage planétaire (uniquement un broyage grossier à la main ou un concassage mécanique avant son stockage). Il présente un spectre sombre (~0.13 à 1.5 µm) et aux bandes d'absorption marquées, identiques à celle des échantillons A et B et à l'inverse du spectre de l'échantillon C. Son niveau de réflectance est en revanche similaire à ce dernier. Cet échantillon est illustré par la photo (D) de la figure 8.3. On constate que les grains ont des tailles de quelques dizaines à plusieurs centaines de microns et possèdent un aspect brillant. Des grains plus fins inférieurs à 25 µm sont présents en minorité dans cet échantillon. Ils recouvrent les gros morceaux de PSOC 1532. On aperçoit donc ici un premier effet d'enrobage.

Enfin, le dernier spectre est celui de l'échantillon E qui est similaire à l'échantillon C à la seule différence qu'il a été tamisé en dessous de 200 µm avant le broyage planétaire de 180 minutes. La photo de cet échantillon ressemble à celle du C figure 8.3 mais les grains mal ou non broyés sont plus petits et moins nombreux. D'un point de vue spectral, l'échantillon E a une réflectance plus proche des PSOC 1532 tamisé en dessous de 25 µm après le broyage planétaire (~0.33 à 1.5 µm).

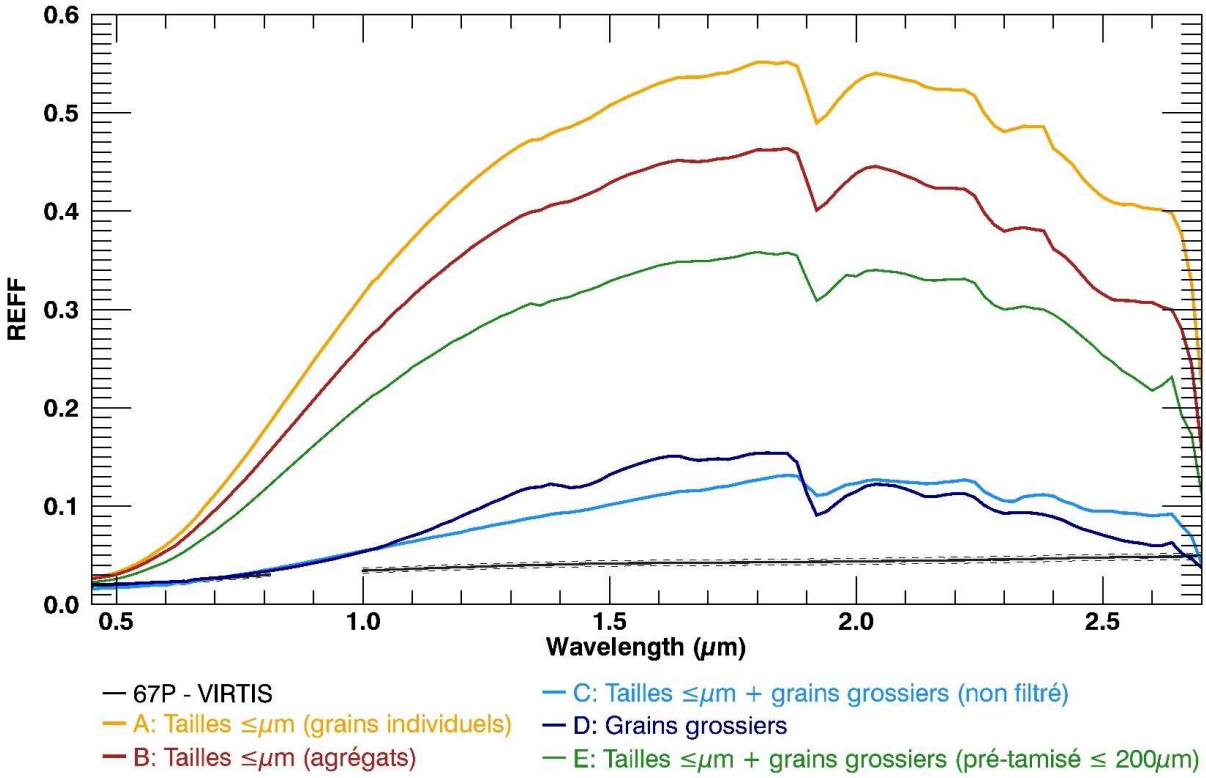


FIGURE 8.2 – Spectres en réflectance de PSOC 1532. Les échantillons A et B sont identiques à ceux de la figure 8.1. L'échantillon C contient à fois des grains de l'ordre du micron et inférieur ainsi que des grains plus gros mal ou non broyés (pas de tamisage après le broyage planétaire). L'échantillon D correspond au PSOC 1532 original, majoritairement fait de grains de quelques dizaines à plusieurs centaines de micromètres. Ces quatre échantillons sont représentés ci-dessous. L'échantillon E est presque similaire au C si ce n'est que le PSOC 1532 a été tamisé en dessous de 200 µm avant le broyage planétaire.

8.1.2 Pyrrhotite

Différentes tailles de grains ont également été testées pour la pyrrhotite dans cette étude, notamment pour caractériser les différences entre des tailles classiques de plusieurs dizaines à quelques centaines de micromètres, obtenues par broyage manuel, et des tailles micrométriques et inférieures obtenues par broyage planétaire. La figure 8.5 rapporte les spectres de six échantillons.

Les trois échantillons ayant subi un broyage planétaire (A, B et C) présentent un spectre presque plat (bien qu'une très légère pente rouge soit visible jusqu'à 2.4 µm) et une réflectance très faible : entre 0.024 et 0.026 à 1.5 µm, ce qui est plus faible que le spectre de référence des observations VIRTIS (0.042 à 1.5 µm). Tout comme pour le PSOC 1532, deux des échantillons broyés au broyeur planétaire ont subi pour l'un une agitation mécanique après le séchage (échantillon A) tandis que le deuxième a subi un concassage manuel après ce séchage (échantillon B). On note que les deux spectres A et B ont des valeurs réflectances très similaires contrairement au PSOC 1532 pour lequel la différence est plus marquée. A la binoculaire, l'échantillon B (visible sur la photo B de la figure 8.5) possède le même aspect que le PSOC 1532 ayant subi le même protocole de broyage et de tamisage (photo A, figure 8.3) ; la pyrrhotite y est à l'état de grains sub-micrométriques indépendants les uns des autres et le passage d'un fil fin et souple au travers suffit à les séparer sans pression. Dans l'échantillon A on note la présence

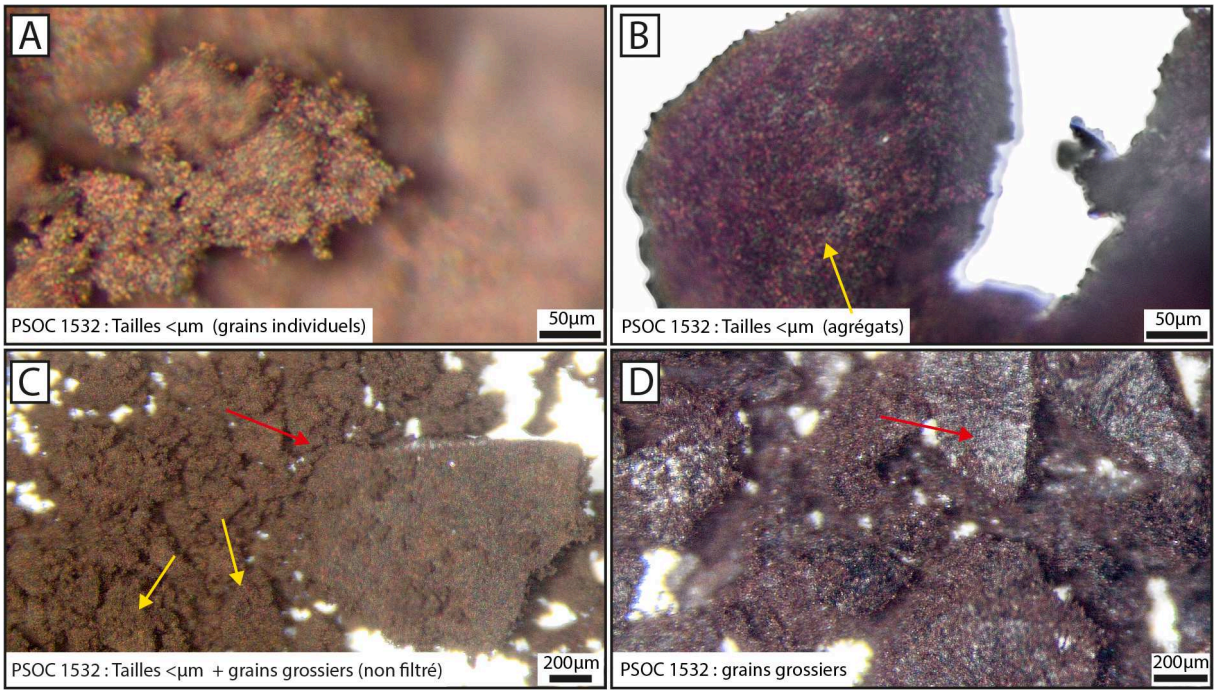


FIGURE 8.3 – Images binoculaires des échantillons correspondants aux spectres ci-dessus. Les flèches jaunes correspondent aux agrégats (constitués de particules fines, sub-micrométriques) et les flèches rouges aux morceaux de PSOC 1532 dans leur état originel, mal ou non broyés. Les lettres des légendes sont en accords avec la figure 8.2.

de quelques agrégats mais ceux-ci sont plus rares que dans l'échantillon de PSOC 1532 équivalent, ils sont également plus fragiles. L'échantillon C a quant à lui subi le même protocole que l'échantillon E du PSOC 1532 de la figure 8.2 : tous les grains introduits dans le bol de broyage planétaire sont inférieurs à 200 µm ; en revanche, l'échantillon n'a pas été tamisé après le broyage, il reste donc des grains mal broyés que l'on peut apercevoir dans la photo binoculaire C de la figure 8.5. Malgré cela, son spectre est identique aux échantillons A et B. Il est possible que l'enrobage des gros grains empêche leurs contributions.

Les quatre échantillons obtenus par broyage manuel au mortier (D : <25 µm, E : 25-50 µm, F : 50-100 µm et G : 100-200 µm) présentent une pente rouge et leur albédo est plus grand que celui de la comète mesuré par VIRTIS, bien que du même ordre de grandeur pour les échantillons D et E. Les pentes spectrales des deux échantillons les plus gros (F et G) sont plus rouges que les échantillons plus fins (D et E). C'est particulièrement le cas dans le visible et dans le proche infrarouge, jusqu'à 1.6 µm environ. Les niveaux de réflectance des échantillons F et G similaires, d'environ 0.155 à 1.5 µm. Ceux des échantillons D et E sont de 0.055 et 0.045 à 1.5 µm respectivement.

8.1.3 Dunites

Les deux dunites sont représentées dans la figures 8.6 dans différentes tailles de grains. Les spectres figurés en traits pointillés correspondent aux échantillons de dunite 1 tandis que les traits pleins correspondent aux échantillons de dunite 2.

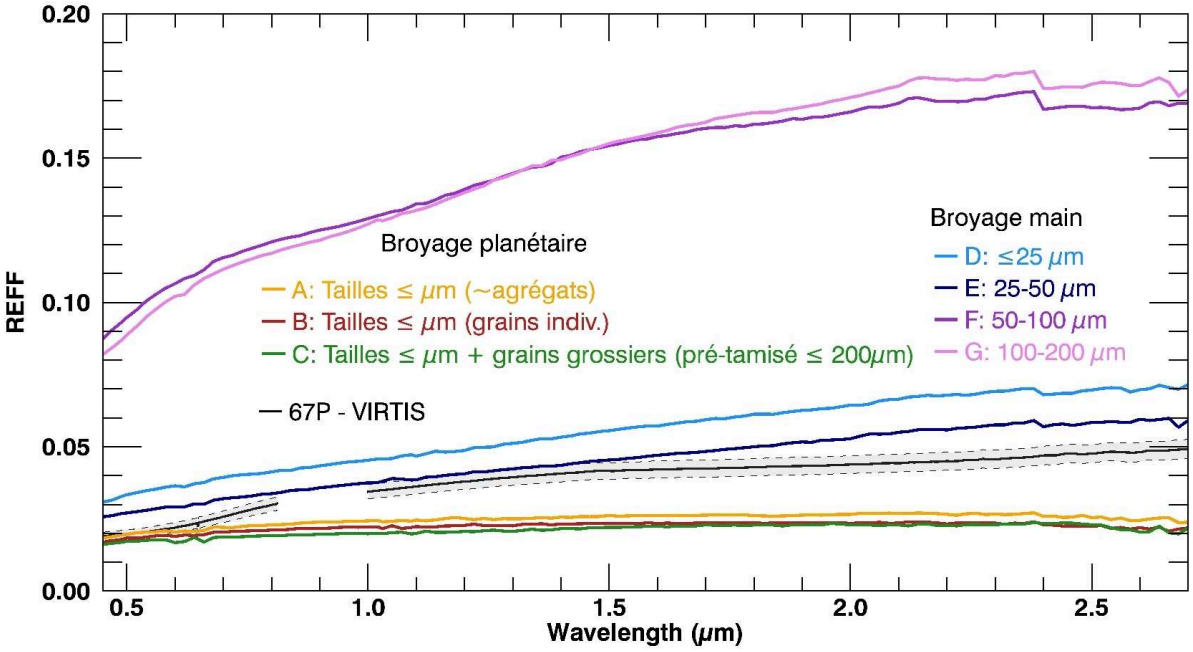


FIGURE 8.4 – 8.5Spectres en réflectance de poudre de pyrrhotite.

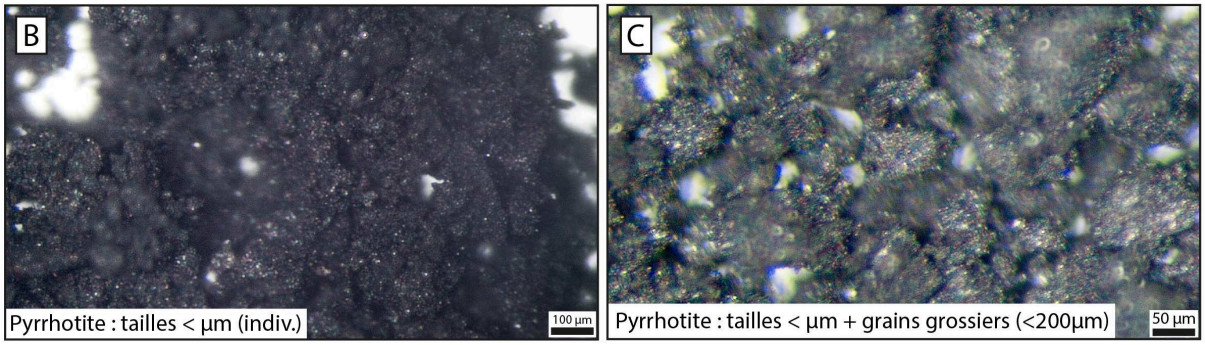


FIGURE 8.5 – Photos binoculaires des échantillons B et C de la figure .

Le spectre A pointillé vert représente l'échantillon original de la dunite 1, issue d'un broyage classique manuel ou mécanique réalisé par le passé et dont la taille des grains avoisine 5 µm environ. Le spectre B en pointillé magenta a été passé au broyeur planétaire et ne contient pas d'agrégat. On retrouve dans ces deux spectres la bande d'absorption complexe située autour de 1.04 µm et due à l'ion fer II. Elle est cependant moins profonde pour le spectre B, notamment parce que l'aile droite de la bande jusqu'au continuum présente une réflectance plus faible, avec une pente moins rouge que le spectre A. La pente spectrale à partir de 1.6 µm est également plus bleue dans le cas de l'échantillon B dont les tailles de grains sont plus petites.

Trois spectres représentent l'échantillon de dunite 2. Le premier est le spectre C qui est celui de l'échantillon original, broyé mécaniquement et dont la taille des grains est inférieure à 80 µm. Cet échantillon a été mesuré à l'université de Bern, pour cette raison, on ne comparera pas son niveau de réflectance avec les autres de façon précise, même si elle est valable au premier ordre. Les spectres D et E de la figure 8.6 représentent les échantillons broyés au broyeur planétaire durant 180 minutes. Le premier échantillon ne contient pas d'agrégats (spectre D, photo de gauche de la figure 8.7) tandis que l'autre en contient (spectre

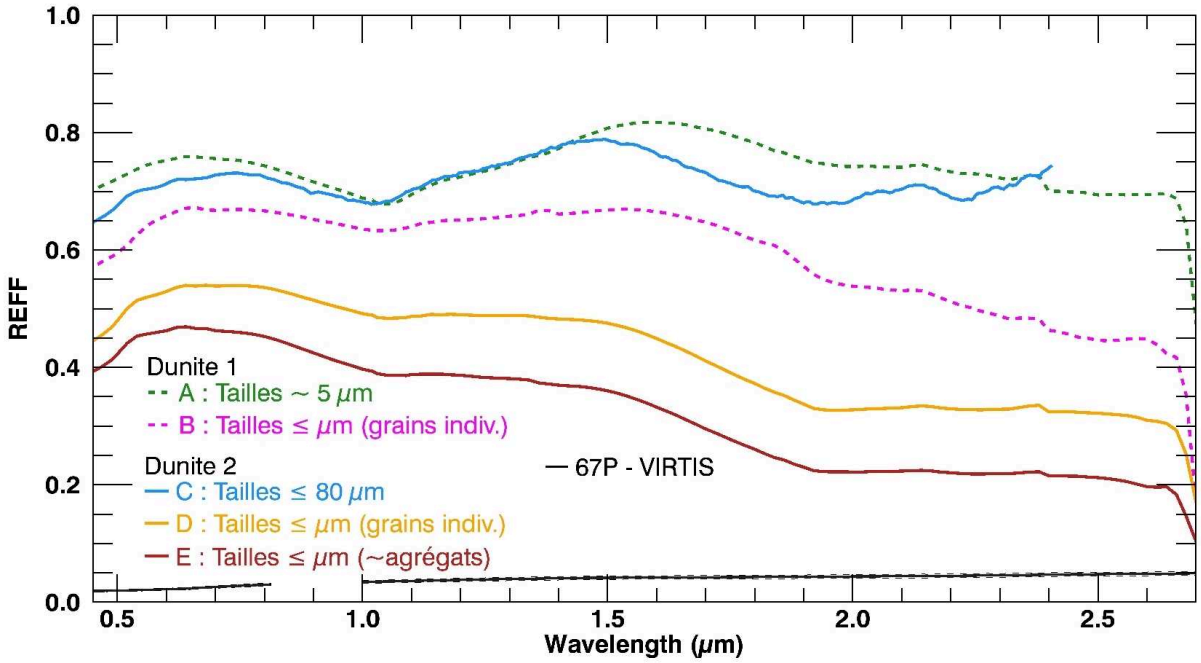


FIGURE 8.6 – Spectre en réflectance des échantillons de dunite 1 et 2 à différentes tailles. Les traits pointillés sont les échantillons de dunite 1 tandis que les pleins sont ceux de dunite 2. Le spectre bleu est issu de mesures réalisées par Olivier Poch.

C figure 8.6 et photo de droite figure 8.7). Comme précédemment ceci est dû au mélange mécanique ou au concassage manuel après le séchage.

Spectralement, le même comportement que le PSOC 1532 est observé pour les échantillons broyés au broyeur planétaire. Ainsi, l'échantillon D concassé à la main possède les plus grandes valeurs de réflectances : 0.48 à 1.5 µm contre 0.36 pour l'échantillon E dans lequel sont présents les agrégats. La forme du spectre et les pentes spectrales sont les mêmes : bleues globalement mais présentant une pente rouge de 0.45 µm à 0.65 µm puis deux plateaux entre 1.05 µm et 1.5 µm et 1.92 µm et 2.6 µm. Dans le spectre C, c'est à dire l'échantillon original, on reconnait plus facilement les caractéristiques de l'olivine puisqu'il présente une bande d'absorption due à l'ion fer II plus marquée. Contrairement aux spectres D et E l'aile droite de cette bande n'est pas plate et la réflectance remonte bien jusqu'à 1.5 µm. Globalement, le niveau de réflectance de cet échantillon est plus haut que les échantillons ayant subi un broyage planétaire.

8.2 Mélanges binaires de grains sub-micrométriques

Les résultats obtenus sur des mélanges se basant sur deux poudres sont présentés dans cette sous-section. Il est important de noter que ces mélanges ne font intervenir que des poudres qui ont été tamisées en dessous de 25 µm après un broyage planétaire de 180 minutes. Elles présentent majoritairement des particules/grains de l'ordre du micromètre et inférieur. Les poudres correspondent aux échantillons A et B des figures 8.2 et 8.3 pour le PSOC 1532, 8.5 pour la pyrrhotite et 8.6 pour la dunite 2. Aucun échantillon de PSOC 1532 et de pyrrhotite contenant des grains non broyés n'est présenté dans ces mélanges binaires.

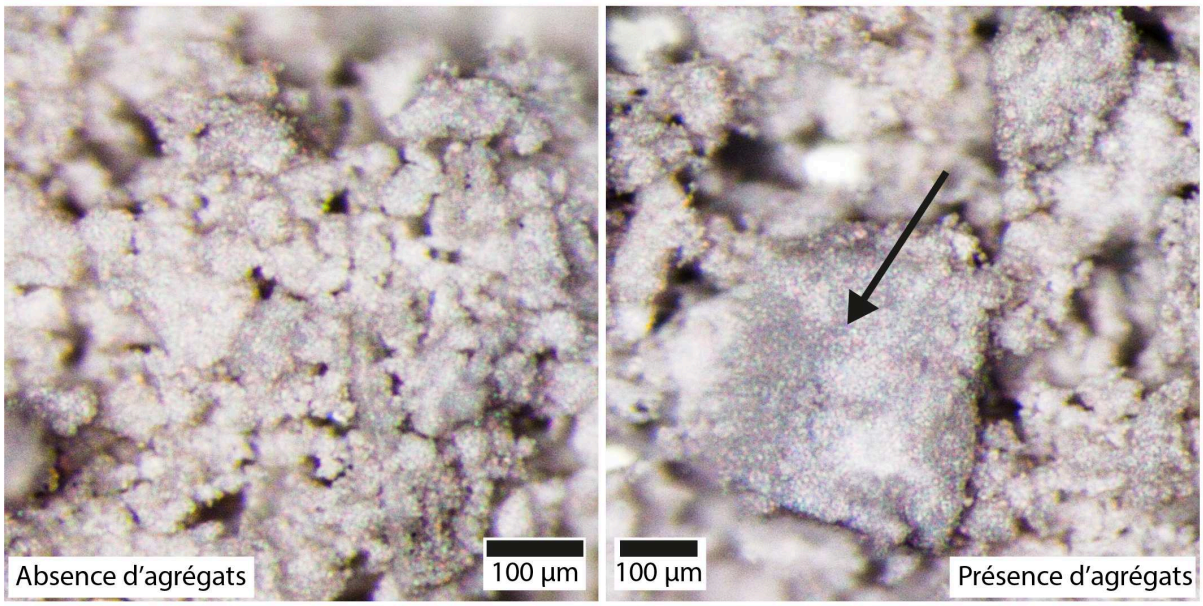


FIGURE 8.7 – Photos des échantillons de dunite 2 réalisées à la binoculaire correspondant à la figure 8.6.

La conséquence de ce choix est de se concentrer sur deux types de mélanges. Pour chaque échantillon est en effet présenté à la fois un mélange réalisé avec l'agitateur mécanique et un mélange réalisé à la main au mortier. Ces deux façons de faire ont été présentées figure 7.18. Le mélange mécanique préservant les agrégats et le mélange manuel au mortier permettant de les écraser et d'obtenir un mélange intime quels que soient les composés.

Les proportions choisies dans les mélanges qui suivent ont été fixées de façon à être si possible dans l'ordre de grandeur de la référence solaire. Cependant, la comparaison de certains rapports élémentaires (C/Si, C/Fe) n'est pas toujours possible entre les mélanges (le carbone est par exemple absent du mélange pyrrhotite/dunite), l'accent a donc plutôt été mis sur le rôle spectral des matériaux et surtout sur le type de mélange, à une concentration donnée.

8.2.1 PSOC 1532 et silicates

La figure 8.8 expose les deux spectres en réflectance des mélanges du PSOC 1532 et de la dunite 2 (A et B). Les composés purs qui entrent dans leurs compositions sont aussi tracés, à la fois dans leur état « agrégats » (spectres D et F en vert) et « grain individuel » (spectres C et E en jaune). Les photos binoculaires de ces mélanges sont dans la figure 8.9.

On remarque que le PSOC 1532 domine globalement les deux types de mélanges. Le mélange intime possède un spectre très proche du PSOC 1532 concassé à la main d'un point de vue de la réflectance. On y retrouve la même forme spectrale et les mêmes bandes d'absorptions. A partir de 0.7 µm il est également plus clair que le spectre B du deuxième mélange. Contrairement aux mélanges binaires présentés par la suite, aucun effet d'enrobage n'est observé. Le mélange est spatial comme on peut le voir sur la photo correspondante (8.9). Son spectre est proche du PSOC 1532 agité mécaniquement et dans lequel sont présents des agrégats.

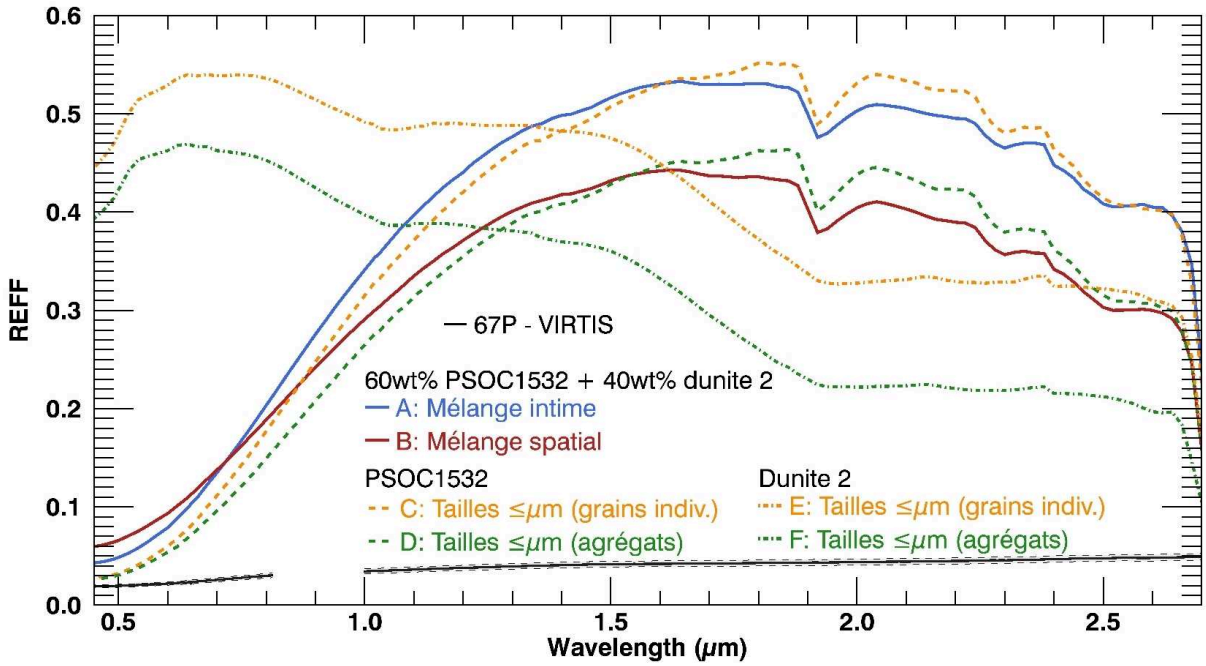


FIGURE 8.8 – Spectres des mélanges intime et spatial de dunite et de PSOC 1532, accompagnés des composés pures.

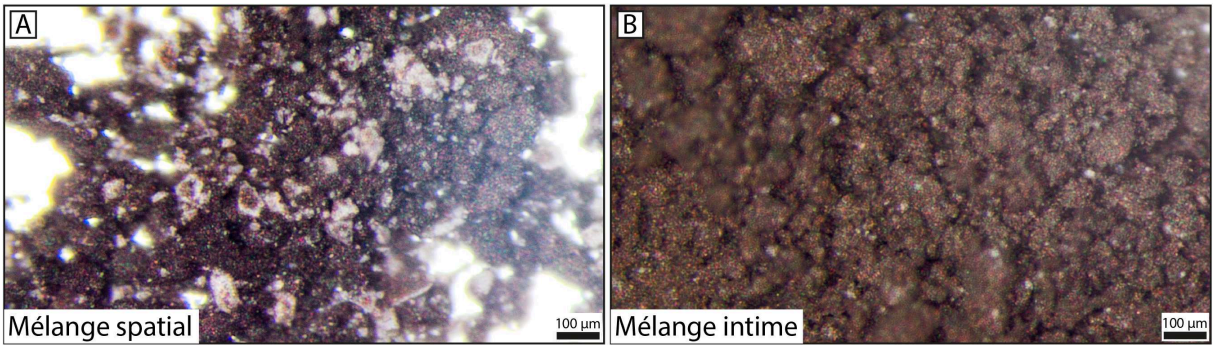


FIGURE 8.9 – Photos binoculaires des mélanges spatial et intime du PSOC 1532 et de la dunite. On distingue clairement les deux composés en A tandis que ceux-ci sont très bien mélangés dans l'échantillon B.

Dans ces mélanges, la dunite semble jouer un rôle mineur. Cependant, les écarts observés entre les spectres des mélanges (A et B) et ceux des PSOC 1532 (C et D) sont sans doute dû à ce composé. Du visible jusqu'à environ 1.5-1.6 µm, intervalle où la réflectance de la dunite est plus élevée que celle du charbon, le spectre des mélanges est ainsi légèrement supérieur à celui du PSOC 1532. Inversement, de 1.5 µm à 2.5 µm, la dunite est plus absorbante que le PSOC 1532 et le spectre des mélanges spatiale et intime est alors légèrement plus sombre.

On note le fort désaccord avec le spectre de référence VIRTIS et ces deux mélanges. Ceux-ci restent bien trop clair que ce soit dans le visible et plus particulièrement dans l'infrarouge. Ces deux composés à eux seuls ne suffisent donc pas à expliquer la composition de la comète.

8.2.2 Pyrrhotite et silicates

Le deuxième mélange binaire fait intervenir la pyrrhotite et la dunite : les spectres sont visibles dans la figure 8.10 page suivante et les photos binoculaires des mélanges en figure 8.11. Selon les deux protocoles suivis, on obtient à nouveau deux types de mélanges. L'échantillon du spectre A, mélangé mécaniquement, présente des agrégats de dunite qui sont recouverts de pyrrhotite. L'échantillon du spectre B, mélangé à la main, donne lieu à un mélange intime.

Le phénomène d'enrobage dans l'échantillon A est très efficace, on peut le constater sur les photos A.1 et A.2 8.11. Sur la première, on observe un agrégat totalement recouvert de pyrrhotite et il est impossible de discerner la dunite. C'est seulement en exerçant une pression dessus, avec un outil de microscopie, que l'on peut le casser et constater qu'il est entièrement composé de dunite (photo A.2). Sur la photo A de cette même figure, plusieurs agrégats sont visibles (notamment désignés par les flèches jaunes), aucun ne laissant apparaitre la dunite (les zones très blanches et brillantes de la photo correspondent au fond éclairé du support).
Spectralement, cet échantillon a des valeurs de réflectances supérieures au spectre VIRTIS dans le visible, mais inférieures dans l'infrarouge. Le spectre est à plat voir légèrement rouge. Aucun bande d'absorption marquée n'est observée. La pyrrhotite, dont le spectre pure est le C, domine ce mélange ; cependant, son écart à ce composant pourrait indiquer que la dunite influe sur le niveau global de la réflectance.

Le mélange B est de type intime. La photo B (figure 8.11) qui lui correspond présente cet échantillon dans lequel aucun agrégat n'est présent. Bien que la pyrrhotite domine visuellement et que l'échantillon est globalement très sombre, on observe tout de même quelques grains de dunite (flèche rouge). D'un point de vue spectral, le spectre B est plat voire très légèrement bleu. Son niveau de réflectance est inférieur à celui de la comète sur toute la gamme mesurée. Il est également similaire à celui de la pyrrhotite pure à l'état de grains individuels. Cette dernière observation laisse penser que la pyrrhotite domine totalement la réflectance de ce mélange intime entre pyrrhotite et dunite.

On notera que le léger changement de pente observé à partir de 2.4 µm est dû à la bande d'absorption de la pyrrhotite située vers 2.7 µm. De manière générale, pour les deux types de mélanges le niveau de réflectance n'est pas en accord avec les mesures de VIRTIS. La pyrrhotite aide cependant à s'en approcher avec plus de succès que dans le cas du mélange entre PSOC 1532 et dunite, notamment dans l'infrarouge qui représente la principale difficulté. Malgré cela, l'accord n'est pas bon et les spectres sont trop plats.

8.2.3 PSOC 1532 et pyrrhotite

La troisième possibilité de mélange binaire utilise le PSOC 1532 et la pyrrhotite. Les spectres et photos A et B de la figure 8.12 illustrent un mélange mécanique et un mélange intime au mortier.

L'échantillon A possède des agrégats de PSOC 1532 recouverts de pyrrhotite. Comme dans le cas précédent où pyrrhotite et dunite étaient mélangées de cette façon (voir spectre et photos A des figures 8.10 et 8.11 page ci-contre), l'enrobage est très efficace et à première vue sous la binoculaire, le charbon

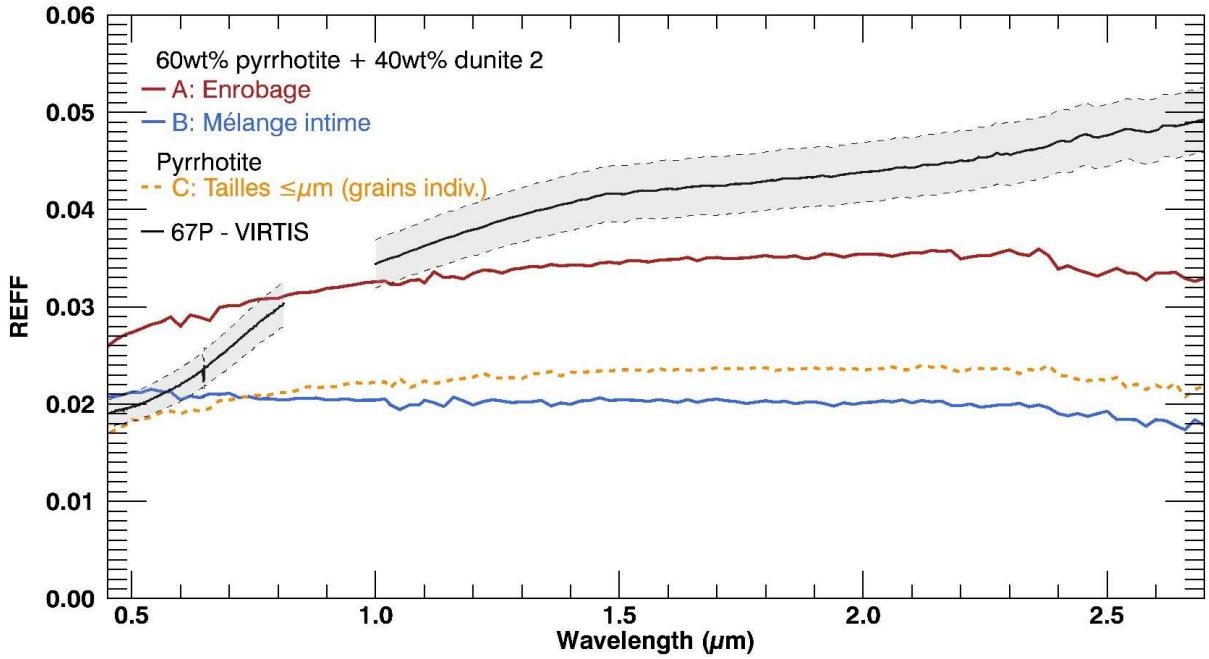


FIGURE 8.10 – Spectre des deux types de mélanges de la pyrrhotite avec la dunite (A et B) accompagné de la référence des observations VIRTIS et de la pyrrhotite pure.

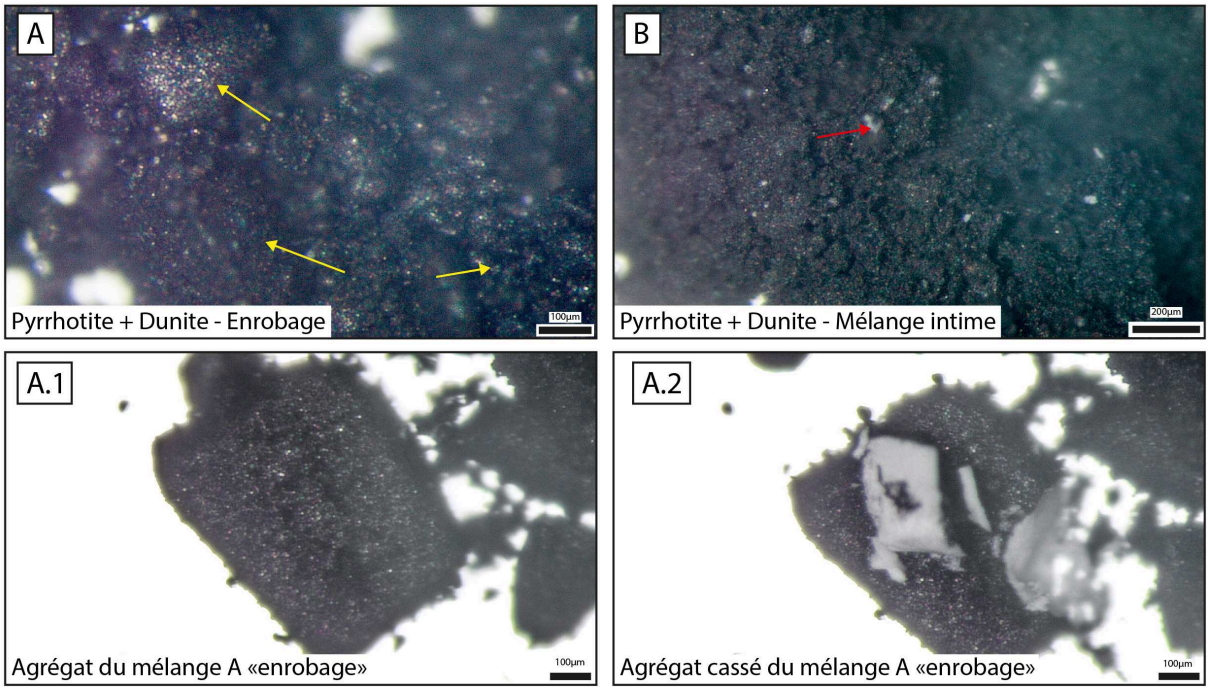


FIGURE 8.11 – Photos binoculaires des mélanges présentés en figure 8.10. La photo A représente le mélange où des agrégats de dunite (flèches jaunes) sont recouverts de pyrrhotite, l'exemple d'un tel agrégat est donné en photos A.1 et A.2. La photo B représente le mélange intime, des grains de dunite sont désignés par la flèches rouge.

semble absent. C'est en cassant un agrégat comme celui de la photo de droite figure 7.20 page 167 que l'on découvre à proprement parlé le PSOC 1532. D'un point de vue spectral, cet échantillon présente une légère pente rouge jusqu'à 2.0 µm ; elle est prononcée dans le visible et un petite inflexion est présente

de 0.7 à 0.9 µm environ. Tandis que la forme globale du spectre est semblable à celui de la pyrrhotite pure (spectre E), le niveau de réflectance est plus important : 0.035 contre 0.024 à 1.5 µm. Le spectre de cet échantillon ne s'accorde pas avec le noyau de 67P bien que la pente spectre dans le visible n'en soit pas trop éloignée.

L'échantillon B ressemble visuellement à tout autre chose puisque c'est le charbon qui domine avec sa couleur marron. La pyrrhotite n'est pas visible dans ce mélange intime. Spectralement, il possède une pente rouge plus prononcée que celle de l'échantillon A dans le visible, elle est également plus en accord avec les observations VIRTIS. Dans l'infrarouge, il s'illustre par une pente plate, en désaccord avec 67P comme l'échantillon A. Son niveau de réflectance est plus proche de la pyrrhotite pure que le spectre A, avec une valeur de réflectance de 0.029 à 1.5 µm.

Dans les deux types de mélange la pyrrhotite domine spectralement. Le graphique en miniature représentant les spectres de PSOC 1532 utilisés rappelle qu'ils possèdent des valeurs de réflectance bien plus élevées, notamment dans l'infrarouge. La pyrrhotite permet ainsi d'atteindre des valeurs de réflectance égales voir inférieures à celles des observations VIRTIS, que ce soit en mélange intime ou lorsque les agrégats de PSOC 1532 en sont enrobés.

8.2.4 Résumé

Les trois mélanges binaires PSOC 1532-dunite, PSOC 1532-pyrrhotite et pyrrhotite-dunite présentent tous des caractéristiques intéressantes : dans les trois cas, c'est le composé le plus sombre qui domine, PSOC 1532 ou pyrrhotite.

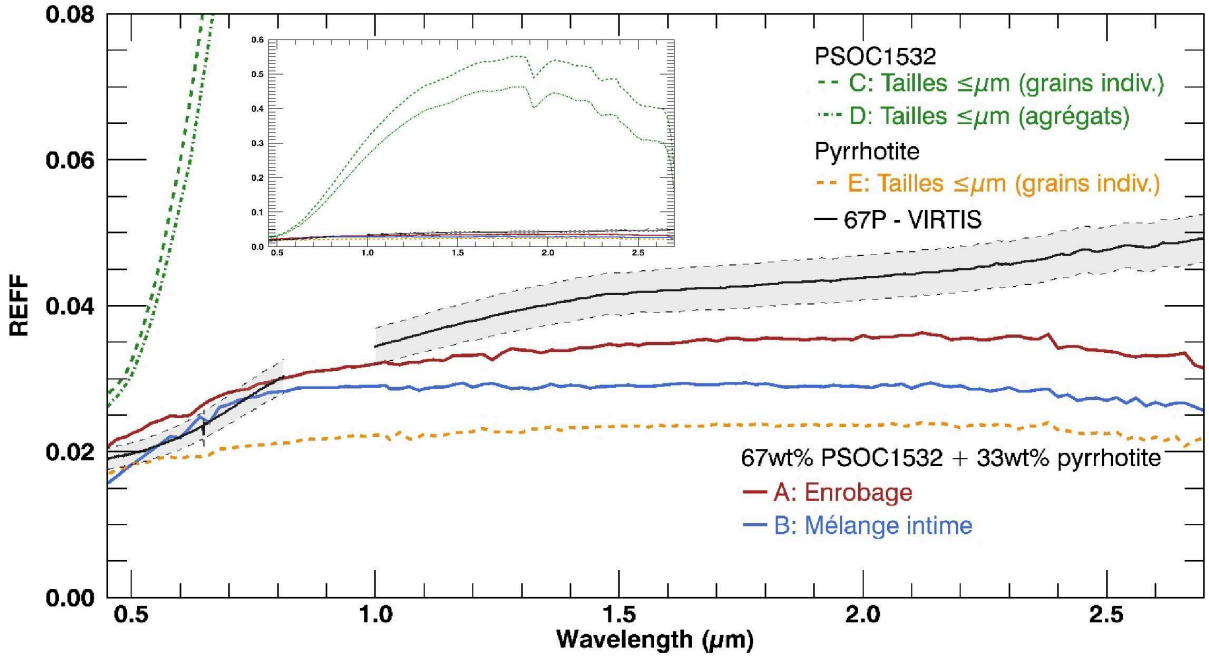
Dans les deux mélanges où la pyrrhotite est impliquée, on remarque également qu'elle domine de façon très forte, au point de diminuer la réflectance à des niveaux inférieurs à ceux mesurés par VIRTIS. Celle-ci aplatit les spectres, rendant ainsi les bandes d'absorption du deuxième composant inobservables. Toujours dans ces deux exemples, les mélange où sont préservés les agrégats présentent des réflectances plus importantes et des pentes spectrales plus rouges que les mélanges intimes où la réflectance est plus faible et la pente presque absente (hormis dans le visible pour le mélange entre pyrrhotite et PSOC 1532).

Le comportement inverse est observé dans le mélange PSOC 1532/dunite puisque c'est le mélange intime qui possède les plus grandes valeurs de réflectance. Cependant, le deuxième étant spatial, la comparaison avec les mélanges où il y a enrobage n'est pas possible. Dans les deux cas, la forme globale du spectre n'est pas énormément affectée, elle se rapproche principalement du PSOC 1532 et ses bandes d'absorption y sont encore visibles.

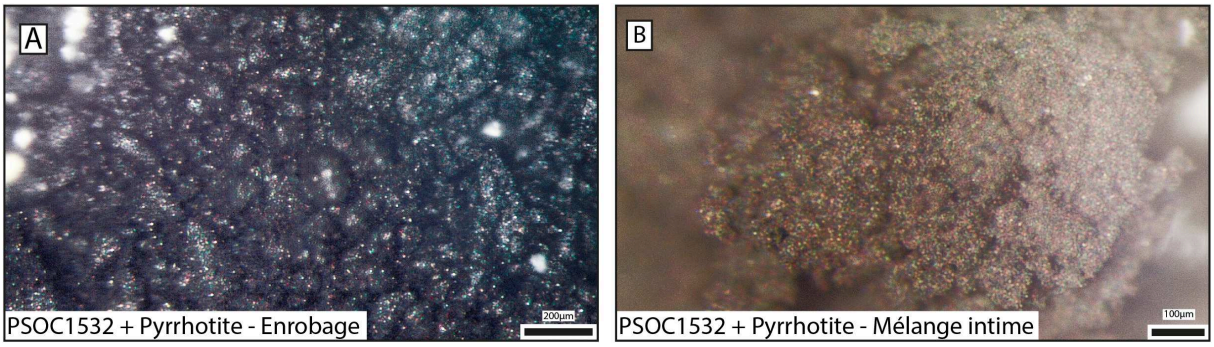
L'ensemble de ces résultats sera discuté dans la discussion au chapitre 9.

8.3 Mélanges ternaires de grains sub-micrométriques

Les mélanges ternaires composés de grains tamisés à 25 µm après broyage et majoritairement de l'ordre du micromètre et inférieur ont été fait en fixant le rapport entre PSOC 1532 et pyrrhotite. Ainsi, le rapport



(a) Spectres des mélanges PSOC 1532 et pyrrhotite accompagnés du spectre de référence VIRTIS et des composés pures.



(b) Photos binoculaires des mélanges de PSOC 1532 et pyrrhotite. Sur la photo A, des agrégats de PSOC 1532 sont recouvert de PSOC 1532 que l'on ne voit pas. A droite, le mélange est intime, c'est le PSOC 1532 qui domine visuellement.

FIGURE 8.12 – Spectres des mélanges PSOC 1532 et pyrrhotite accompagnés de leurs photos binoculaires.

C/Fe oscille entre 8 et 10 et reste proche de la valeur de référence solaire de 8.7 (Lodders, 2010) ; sa variabilité étant due aux différentes quantités de dunite inclues dans le mélange qui en apporte un peu.

A nouveau, les deux types de mélanges – au mortier et à l'agitateur mécanique – ont été réalisés. En plus de cela, pour chaque cas, la dunite a été introduite en différentes proportions : 5, 10, 20 et 30% en masse. Le mélange au mortier est à nouveau intime tandis que la pyrrhotite enrobe des agrégats de PSOC 1532 et de dunite dans celui réalisé à l'agitateur. Les deux mélanges contenant 30% en masse de dunite sont visibles sur les photos A et B de la figure 8.13b. Visuellement c'est la pyrrhotite qui domine dans les deux échantillons A et B, d'où leur couleur noir. A noter que sur les photos, le blanc correspond au fond du support et en aucun cas de la dunite. Dans l'échantillon A, les agrégats sont parfaitement recouverts, il n'est pas possible de distinguer s'ils sont composés de PSOC 1532 ou de dunite. Avec une petite pointe de microscopie il est possible de les casser ou éventuellement de gratter leur surface. Les photos A.1 et A.2 illustrent ces exemples avec un agrégat de dunite dont le bout est cassé et laisse apparaitre sa

composition (A.1) ; la photo A.2 montre quant à elle un agrégat de PSOC 1532 dont certaines parties ne sont plus recouvertes par la pyrrhotite. On peut supposer que dans un tel cas, la contribution spectrale du PSOC 1532 est bien effective.

La figure 8.13a présente les 8 spectres des échantillons de ces mélanges ternaires. Quatre correspondent au type intime, quatre au type « enrobage » et la proportion de dunite varie dans chacun d'eux. Deux tendances ressortent clairement et chacune est identifiée à un type de mélange.

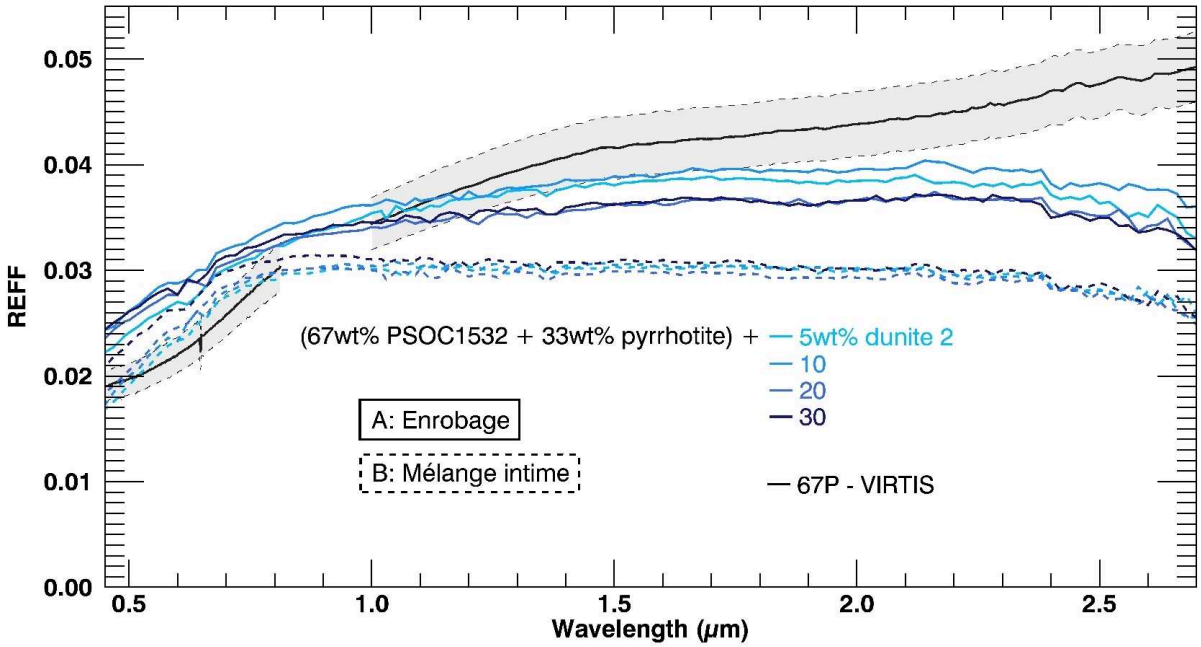
Tous les mélanges intimes (B, en pointillés) présentent une pente spectrale rouge dans le visible, proche de celle du noyau de 67P. La réflectance est également dans la barre d'erreur des observations de référence. En revanche, à partir de 0.8 µm, la pente rouge n'est plus présente et laisse place à un plateau jusqu'à 2.5 µm (l'infléchissement situé au-delà est dû à la bande d'absorption à 2.7 µm de la pyrrhotite). La conséquence est un désaccord avec 67P au niveau de la réflectance avec une valeur d'environ 0.03 à 1.5 µm pour l'ensemble des échantillons. La dunite ne joue ainsi aucun rôle visible dans ces spectres et les variations sont négligeables. Seuls les mélanges contenant 30% en masse de dunite se démarque avant 1.0 µm et possède une réflectance légèrement plus importante (0.025 contre 0.023 à 0.55 µm). Cependant, aucune tendance ne ressort.

De la même manière, tous les mélanges caractérisés par l'enrobage de la pyrrhotite sur les agrégats de dunite et de PSOC 1532 (A, traits pleins) présentent une pente rouge dans le visible, elle aussi similaire à celle de 67P. La réflectance dans ce domaine ne donne pas un aussi bon accord et est légèrement supérieure à celle de VIRTIS (entre 0.025 et 0.027 à 0.55 µm). La pente spectrale de ces échantillons diminue progressivement entre le visible et l'infrarouge ; tout comme la réflectance, elle n'est pas égale à celle de la comète au-delà de 0.8 µm. A nouveau, aucune tendance n'est visible selon la variation de la quantité de dunite.

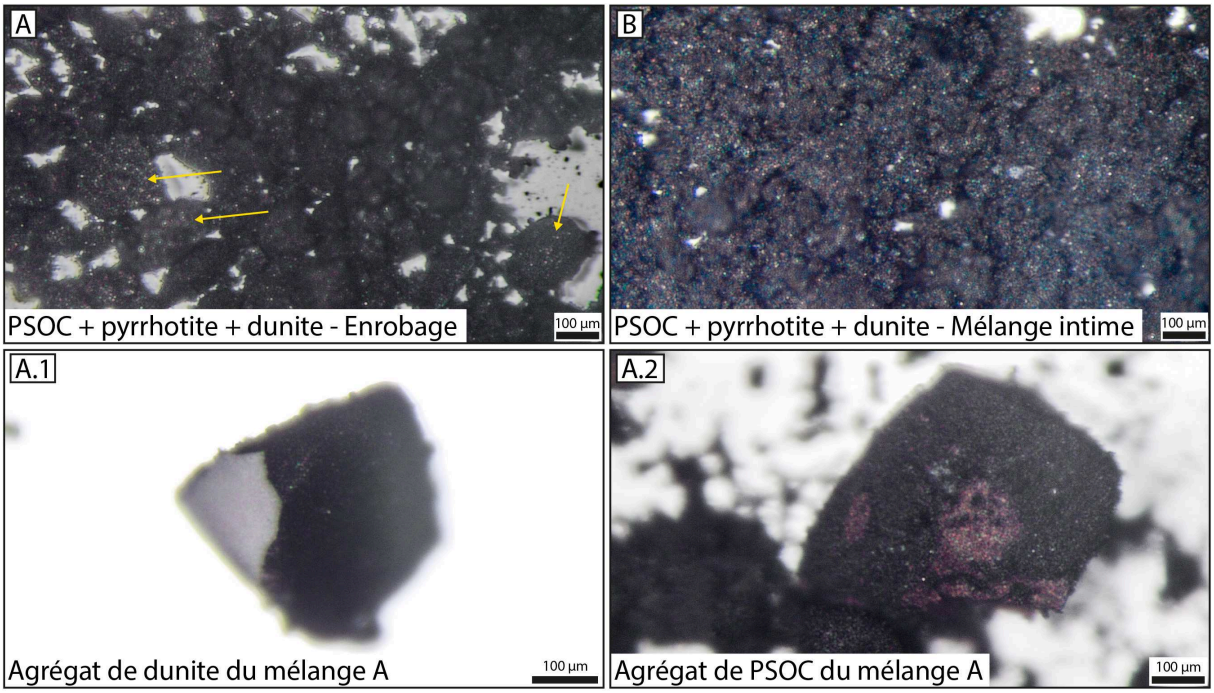
8.4 Mélanges à tailles de grains variées (« mixtes »)

Les trois exemples qui suivent, bien que reposant sur la même composition, sont présentés séparément car les tailles de grains en leur sein ne sont plus les mêmes que précédemment. Contrairement aux exemples de la section précédente, les échantillons de PSOC 1532 et de pyrrhotite utilisés n'ont pas été tamisés en dessous de 25 µm après le broyage planétaire ; ils ont subi un pré-tamisage dans certains cas. Cela fait d'eux des échantillons plus complexes du point de vue de l'interprétation que l'on peut en tirer (voir la discussion au chapitre 9).

Dans cette section, la dichotomie entre les deux types de mélange enrobage/intime n'a pas lieu d'être car des grains grossiers comme ceux des spectres C et E des figures 8.2 et 8.3 sont présents (les grains de PSOC 1532 du spectre D de cette même figure, non broyés, n'ont pas été utilisés dans les mélanges). Il est alors impossible d'obtenir un mélange intime car ces grains, non broyés même après le broyeur planétaire, ne se cassent pas non plus à la main au mortier. Dans tous les exemples qui suivent, les matériaux utilisés ont tous subi un broyage planétaire de 180 minutes et les mélanges ont été effectués à l'agitateur mécanique selon le protocole classique (figure 7.18 page 165).



(a) Spectres du mélange ternaire PSOC 1532-pyrrhotite-dunite. La proportion PSOC 1532-pyrrhotite est gardée constante tandis que la quantité de dunite varie entre 5 et 30% en masse



(b) Photos binoculaires du mélange PSOC 1532-pyrrhotite-dunite. Les flèches jaunes désignent des agrégats de PSOC 1532 ou de dunite (non différentiable en l'état). En A.1 et A.2, c'est une fois cassés ou découverts de la couche de pyrrhotite qui les recouvre que les agrégats révèlent leur composition.

FIGURE 8.13 – Spectres et photos binoculaires du mélange ternaire PSOC 1532-pyrrhotite-dunite.

8.4.1 Mélanges binaires PSOC 1532 :Pyrrhotite, impact de la concentration en pyrrhotite

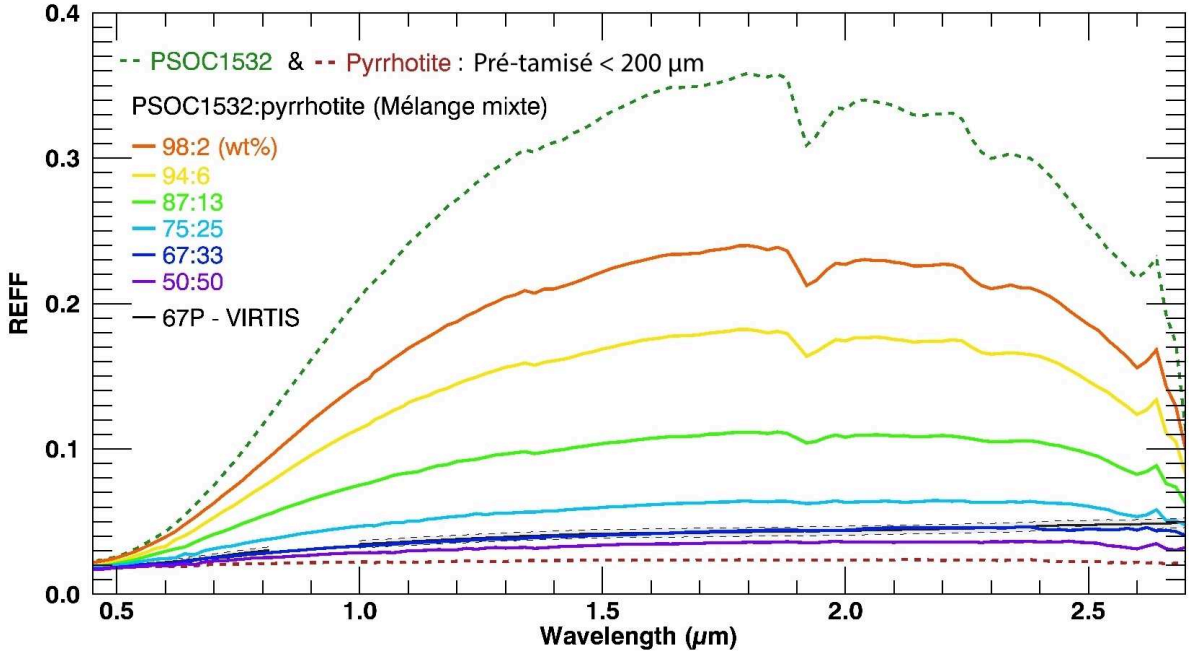
Les premiers mélanges présentés utilisent le PSOC 1532 et la pyrrhotite qui ont été pré-tamisés à 200 µm avant le broyage planétaire. Aucun filtrage/tamisage n'a été fait après. Il en résulte la présence de grains mal broyés comme on peut le voir sur les photos des échantillons C de la figure 8.16 page 190 (flèches bleues) et de la figure 8.3 page 175 (flèche rouge). Ces grains sont principalement du PSOC 1532 ; en effet, la pyrrhotite est broyée plus efficacement, que ce soit au mortier ou au broyeur planétaire. La plupart des grains de pyrrhotite introduits dans le broyeur planétaire sont ainsi généralement bien plus petits que 200 µm. Les spectres des composés purs ont été représenté en pointillé verts pour le PSOC 1532 et en pointillé rouges pour la pyrrhotite dans les graphiques de la figure 8.14.

Les spectres en traits pleins contiennent une proportion croissante de pyrrhotite : de 2% en masse à 50% en masse. Plus la teneur en pyrrhotite est élevée plus le spectre s'assombrit, plus les bandes d'absorptions (par exemple à 1.9 µm) sont atténuées et moins la pente est rouge. La diminution en réflectance est rapide puisque l'on passe de 0.33 à 1.5 µm pour le PSOC 1532 pur à 0.22 à 1.5 µm dès 2% en masse de pyrrhotite. Le niveau de réflectance est du même ordre de grandeur que celui du noyau de 67P à partir de 33% en masse de pyrrhotite. Dans le visible et l'infrarouge le spectre est dans les barres d'erreurs des observations VIRTIS. La pente spectrale comme le niveau de réflectance s'accordent parfaitement avec 67P. La photo de l'échantillon correspondant à ce spectre est représentée en figure 8.16 page 190 (photographies C). Au-delà, avec 50% en masse de pyrrhotite, l'accord est toujours bon dans le visible bien que légèrement plus bas en réflectance. Dans l'infrarouge, la pente spectrale est toujours rouge et similaire à 67P et au mélange à 33% en masse, en revanche le niveau de réflectance est trop bas et la pyrrhotite domine trop pour avoir un bon accord.

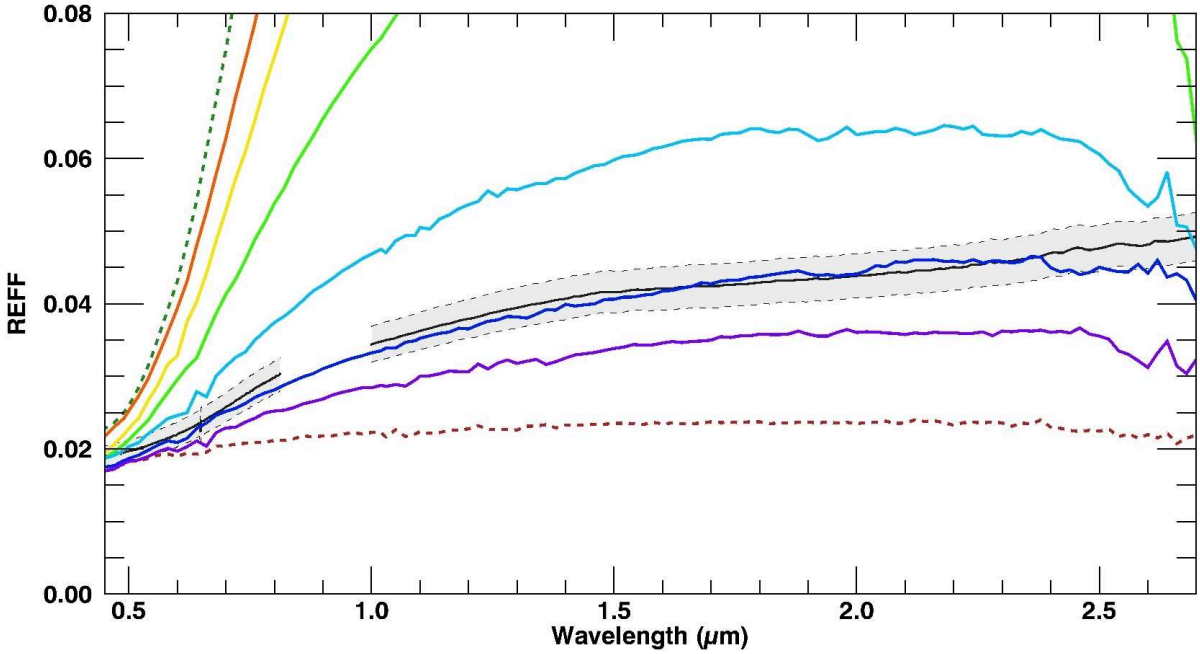
8.4.2 Mélanges binaires PSOC 1532 :Pyrrhotite, impact de la taille des grains de PSOC 1532

Le mélange contenant 33% en masse de pyrrhotite a été réalisé avec deux PSOC 1532 différents. Le premier est identique à celui des mélanges « mixtes » des figures 8.14 page ci-contre et correspondant à l'échantillon E de la figure 8.2 page 174. Il a donc été pré-tamisé à une taille inférieure à 200 µm avant le broyage planétaire mais n'a pas été filtré après. Il contient quelques gros grains de PSOC 1532 non broyés. Son spectre est représenté en A (vert, trait plein) dans les figures 8.15. Le deuxième est un PSOC 1532 n'ayant subi aucun tamisage avant et après le broyage planétaire. C'est l'échantillon C des figures 8.2 et 8.3 page 175 et il est représenté en B (vert, pointillé) dans les figures 8.15. Pour rappel, ce deuxième échantillon contient plus de grains grossiers non ou mal broyés et il possède une réflectance bien plus faible que celui ayant subi un pré-tamisage.

Le spectre C de la figure 8.15b utilise le PSOC 1532 pré-tamisé (échantillon A), il a été décrit précédemment (voir 8.4.1). Mélangé avec les 33% en masse de pyrrhotite il colle parfaitement au spectre VIRTIS de référence. Cet échantillon est visible sur les photos C de la figure 8.16 page 190. On y observe des grains non broyés de PSOC 1532 et de pyrrhotite (flèches bleues), mais également des agrégats de PSOC



(a) 8.14bSpectre des mélanges de PSOC 1532 avec une proportion croissante de pyrrhotite.



(b) Zoom de la figure , légende identique.

FIGURE 8.14 – Spectres de réflectance des mélanges « mixtes » de PSOC 1532 et de pyrrhotite (tailles de grains variés) et des composés purs. Les traits pleins représentent les mélanges dans lesquels la proportion de pyrrhotite est croissante, allant de 2% en masse à 50% en masse. Le meilleur accord avec le spectre du noyau de 67P est avec 33% en masse de pyrrhotite.

1532, totalement (photo de gauche) ou partiellement (photo de droite) recouverts de pyrrhotite (flèches rouges).

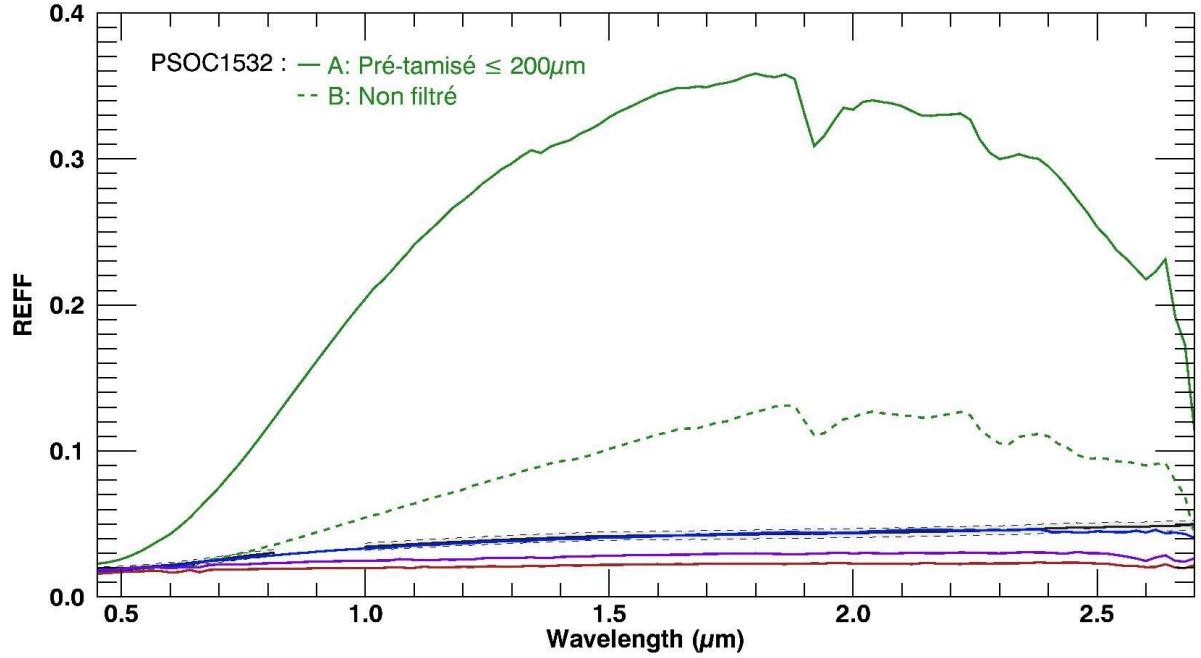
Le mélange D contient la même proportion de pyrrhotite mais les grains non broyés de PSOC 1532 y

sont plus gros. On le voit sur les photos D de la figure 8.16 page 190 où ceux-ci peuvent dépasser les 200 µm (flèches jaunes). Le spectre de ce mélange présente des valeurs de réflectance plus faibles que l'échantillon C et l'accord avec les observations VIRTIS n'est pas bon (0.028 contre 0.042 à 1.5 µm). L'ordre de grandeur est cependant le même dans le domaine du visible où, en revanche, la pente spectrale n'est pas en accord. C'est l'inverse dans l'infrarouge où celle-ci est presque similaire à 67P et au mélange avec 33% en masse de pyrrhotite.

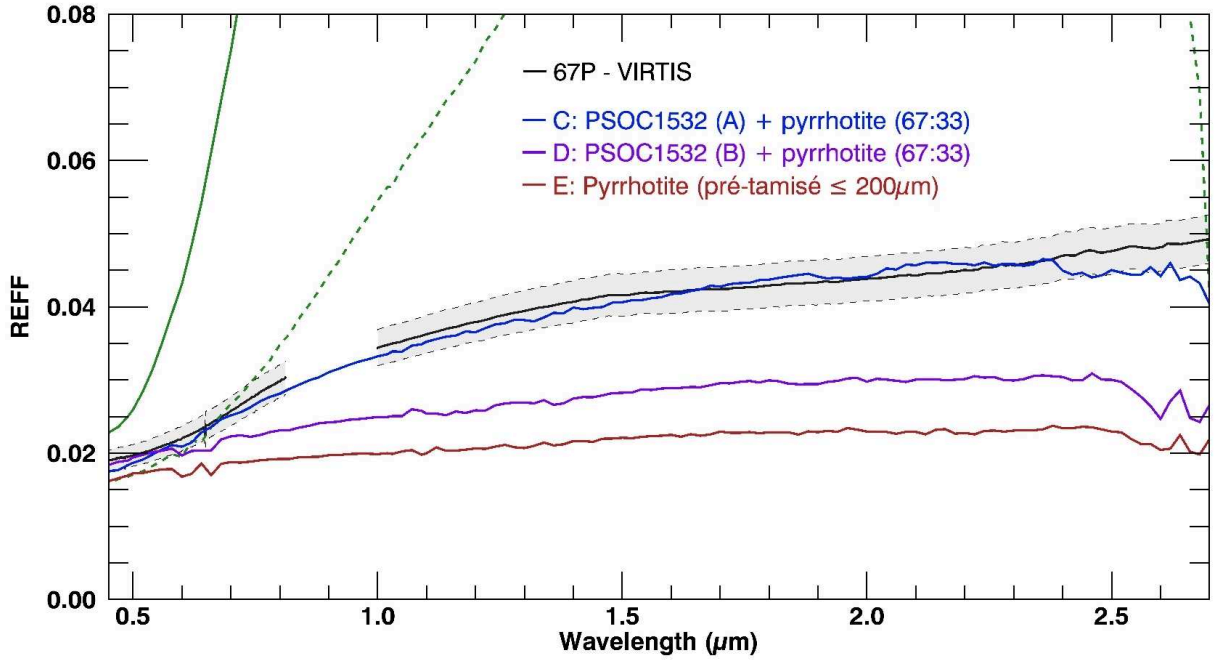
8.4.3 Mélanges ternaires PSOC 1532 :Pyrrhotite :Dunite, impact de la concentration en dunite

Les proportions du mélange en accord avec les observations VIRTIS a été utilisé comme base pour tester l'influence de la dunite. Dans la figure 8.17 page 190 sont représentés les spectres de mélanges contenant une quantité croissante de dunite ajoutée à un mélange contenant 67% en masse de PSOC 1532 et 33% en masse de pyrrhotite. Ces deux composés étant les mêmes que ceux utilisés précédemment, à savoir qu'ils ont été pré-tamisés < 200 µm mais pas filtrés après le broyage planétaire.

De 1% en masse à 3% en masse de dunite l'influence n'est pas visible dans les spectres mesurés. La réflectance commence à augmenter à partir de 5% et plus clairement à partir de 10% en masse et jusqu'à 50% en masse. Cette augmentation se fait majoritairement dans le visible où la pente spectrale devient de moins en moins rouge à mesure que la dunite est en plus grosse quantité ; elle devient même bleue sur toute la gamme mesurée lorsque la proportion atteint 50% en masse. Ces mélanges ont été réalisés à l'agitateur mécanique (la présence de grains non broyés empêche la réalisation d'un mélange intime). Il est intéressant de noter que la dunite a ici une influence qu'elle n'a pas dans les mélanges intimes et où l'enrobage a lieu, représentés figure 8.13a page 185, y compris à proportions égales.



(a) Les spectres des PSOC 1532 utilisés dans les mélanges sont ici visible en vert.



(b) Zoom de la figure 8.15a.

FIGURE 8.15 – Spectres de réflectance de mélanges à base de PSOC 1532 (67% en masse) et de pyrrhotite (33% en masse) mais dont le PSOC 1532 vient de deux protocoles différents. Les spectres purs de PSOC 1532 et de pyrrhotite sont aussi représentés. Les légendes sont communes aux deux graphiques.

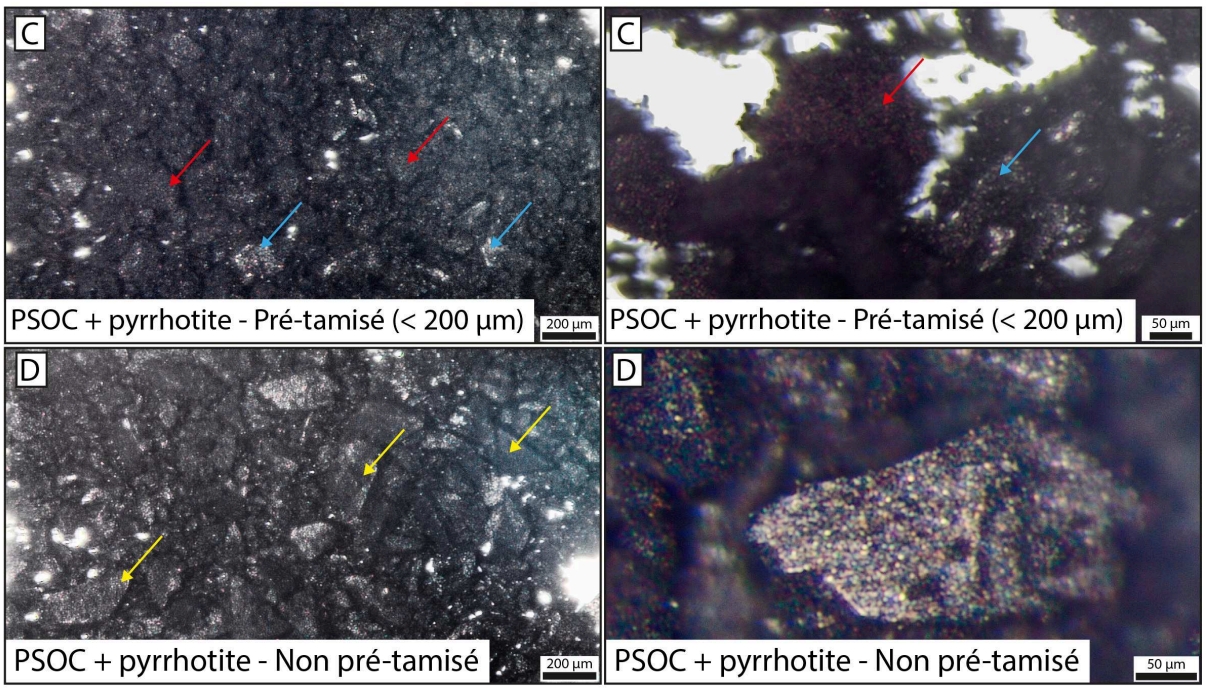


FIGURE 8.16 – Photos binoculaires des mélanges de PSOC 1532 et de pyrrhotite, tous deux dans les mêmes proportions mais avec des PSOC 1532 ayant subi des protocoles différents (voir texte).

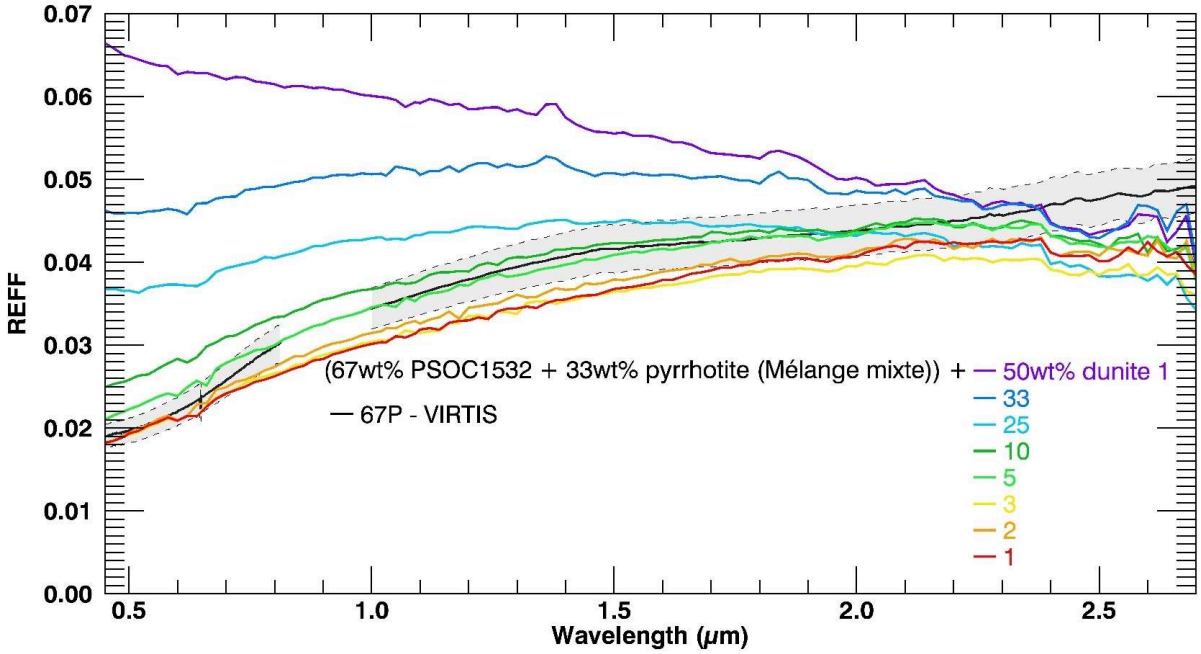


FIGURE 8.17 – Spectres des mélanges de PSOC 1532, pyrrhotite et dunite avec une proportion de dunite croissante dans chaque échantillon. La rapport PSOC 1532 :pyrrhotite est gardé constant à 67 :33% en masse.

Chapitre 9

Discussion

9.1 Introduction

La réflectance mesurée dans les spectres présentés précédemment varie d'une part selon le matériau (taille des grains, composition, type de mélange) et d'autre part selon l'expérience elle-même (longueur d'onde de la lumière utilisée, géométrie d'observation). Lors de telles expériences, nous nous plaçons dans une situation où la lumière interagit avec un milieu granulaire où les particules sont non seulement irrégulières mais également en contact proche les unes avec les autres. Voici un bref rappel des phénomènes physiques en jeu s'appuyant sur les schémas de la figure 9.1.

— Première interaction possible entre un photon et une particule : la **diffraction** ; *a priori*, cette composante est négligeable dans le cas d'un milieu où les particules sont proches comme c'est le cas ici et celui des régolites planétaires.

— La deuxième interaction est la **réflexion** (schéma de droite de la figure 9.1). Lorsqu'elle est dite *spéculaire*, elle obéit à la loi de Snell-Descartes, et l'angle d'émission est égale à l'angle d'incidence. Dans cette situation, l'énergie réfléchie est concentrée dans cette direction privilégiée (cas d'école : le reflet du Soleil à la surface d'un lac...de Titan !). La réflexion est dite *diffuse* dans les autres situations, lorsque l'observateur ne se trouve pas dans la direction privilégiée du reflet spéculaire et que la surface renvoie la lumière dans de multiples directions en raison de sa rugosité. Le cas particulier de la réflexion diffuse est la diffusion par une surface lambertienne ; celle-ci réfléchit la lumière de façon homogène dans toutes les directions. De telles surfaces – ou ce qui s'en approche le plus – sont utilisées en laboratoire comme cibles de calibration, c'est le cas du Spectralon par exemple. Dans la « vraie vie », les surfaces naturelles exhibent une combinaison des composantes spéculaire et diffuse (Britt and Pieters, 1988).

— Troisième interaction possible : la **transmission** à travers le dioptre rencontré. Si les deux milieux ont des indices optiques différents et que l'incidence n'est pas nulle il est dévié selon les lois de Snell-Descartes et subi ainsi le phénomène de **réfraction**. On présente souvent directement la réfraction à la place de la transmission, même si dans le cas d'une incidence nulle il n'y aura pas

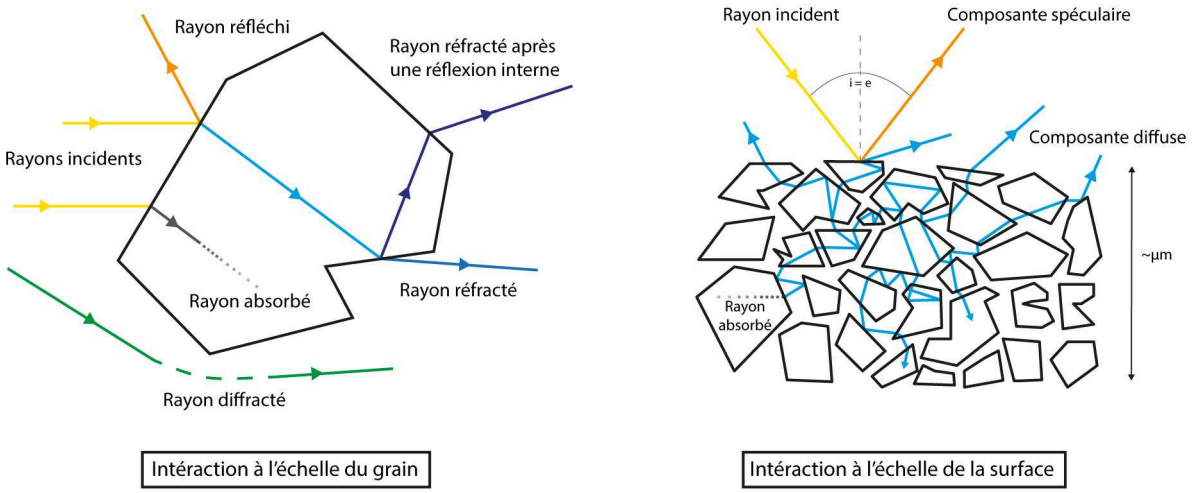


FIGURE 9.1 – Schéma illustrant les différentes interaction lumière/matière à l'échelle d'un grain (à gauche) et à l'échelle de la surface (à droite). La diffraction (rayon vert), la réfraction (rayons bleus) et la réflexion (rayon orange), sont valables dans le cadre de l'optique géométrique, c'est à dire quand la particule est grande devant la longueur d'onde. Au cours de son trajet, le photon peut être absorbé (rayon noir). A droite, on identifie deux composantes lorsqu'un photon arrive en surface, la réflexion spéculaire concentre l'énergie dans une direction précise tandis que la composante diffuse se fait selon les autres directions et potentiellement après diffusion à travers le milieu. Généralement, la profondeur sondée est de l'ordre de la longueur d'onde soit quelques microns dans le VIS-IR.

déviation. Une fois réfracté une première fois, le photon peut subir une ou plusieurs réflexions internes avant d'être éventuellement à nouveau réfracté pour, ainsi, sortir du grain. Tout dépend ici des propriétés du matériau et surtout de l'angle d'incidence aux dioptres rencontrés.

— Enfin, si le photon est transmis dans le milieu alors il va subir une **absorption**. Au cours de son trajet à travers un grain, le photon interagit avec la matière constituant le grain. De cette interaction naît l'absorption qui s'exprime par la loi de Beer-Lambert, pour une longueur d'onde donnée et pour un milieu isotrope comme :

$$I = I_0 \times \exp(-\alpha x)$$

avec I_0 l'intensité incidente, α le coefficient d'absorption et x la longueur du trajet optique. La dépendance en longueur d'onde λ se fait ici avec le coefficient α valant :

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda}$$

où k est la partie imaginaire de l'indice de réfraction. L'absorption peut être exprimée à travers une autre variable : l'inverse du coefficient d'absorption, que l'on appelle distance caractéristique d'absorption ou éventuellement longueur d'absorption :

$$l_e = \frac{1}{\alpha}$$

Ce paramètre correspond à la longueur pour laquelle l'intensité à travers un milieu absorbant, un grain typiquement, est atténuée d'un facteur $e \approx 2.72$. Le coefficient et la longueur d'absorption pour différent matériaux sont représentés dans la figures 9.2.
Les absorptions dans les spectres en réflectance ont de multiples origines : rotation moléculaire, vibration de la maille cristalline, processus électroniques (transition électronique, transfert de charge). Ces mécanismes ne seront pas discutés en détails ici, le lecteur est renvoyé vers Adams (1974, 1975); Gaffey et al. (1993); Burns (2005) pour leurs descriptions théoriques ainsi que vers Clark (1999) qui contient en plus de nombreux exemples.

Les différents phénomènes évoqués précédemment prennent place dans le cadre de l'interaction entre une onde électromagnétique et une particule grande devant la longueur d'onde en jeu. Ce cadre, dans lequel la diffusion (au sens de l'atténuation de la lumière ici) peut être expliqué, est celui de l'optique géométrique. Il y a donc deux types de phénomènes conduisant à une perte d'énergie lorsqu'une onde électromagnétique rencontre une particule : la réflexion, ou diffusion de surface, et l'absorption, ou diffusion en volume. Celles-ci s'expriment souvent à travers leurs sections efficaces dites de diffusion et d'absorption (σ_S pour la réflexion et σ_A pour l'absorption) qui traduisent le rapport entre l'énergie perturbée par la particule (ayant interagie avec elle) et l'énergie totale qu'elle reçoit. En normalisant ces grandeurs par la section efficace de la particule ($\sigma = \pi a^2$, où a est le rayon de la particule) on définit les coefficients de diffusion Q_S et d'absorption Q_A. Parce qu'absorption et réflexion contribuent à l'extinction mais ne dépendent pas de façon identique des mêmes variables (notamment en raison de la multiplicité des chemins parcourus par les photons lors du processus d'absorption) on définit cette extinction comme la somme des deux phénomènes :

$$\sigma_E = \sigma_S + \sigma_A$$

$$Q_E = Q_S + Q_A$$

Intrinsèquement, chaque matériau possède des propriétés optiques qui vont définir la façon dont il diffuse. Ces propriétés optiques s'expriment à travers l'indice de réfraction n :

$$n = n_r + ik$$

où n_r est la partie réelle de l'indice et k la partie complexe. La partie réelle décrit la déviation subie par la lumière au dioptre tandis que la partie complexe n'a de sens que pour un matériau absorbant dont elle décrit cette caractéristique. Les constantes optiques de la troïlite, de la pyrrhotite et de l'olivine entre 0.3 µm et 1.1 µm sont données dans la figure 9.2. Tandis que la partie réelle de l'indice de réfraction de ces trois matériaux est du même ordre de grandeur, l'indice imaginaire peut prendre des valeurs faibles (entre 10^{-1} et 10^{-2}) pour l'olivine en comparaison à la troïlite et à la pyrrhotite (entre 1 et 3),

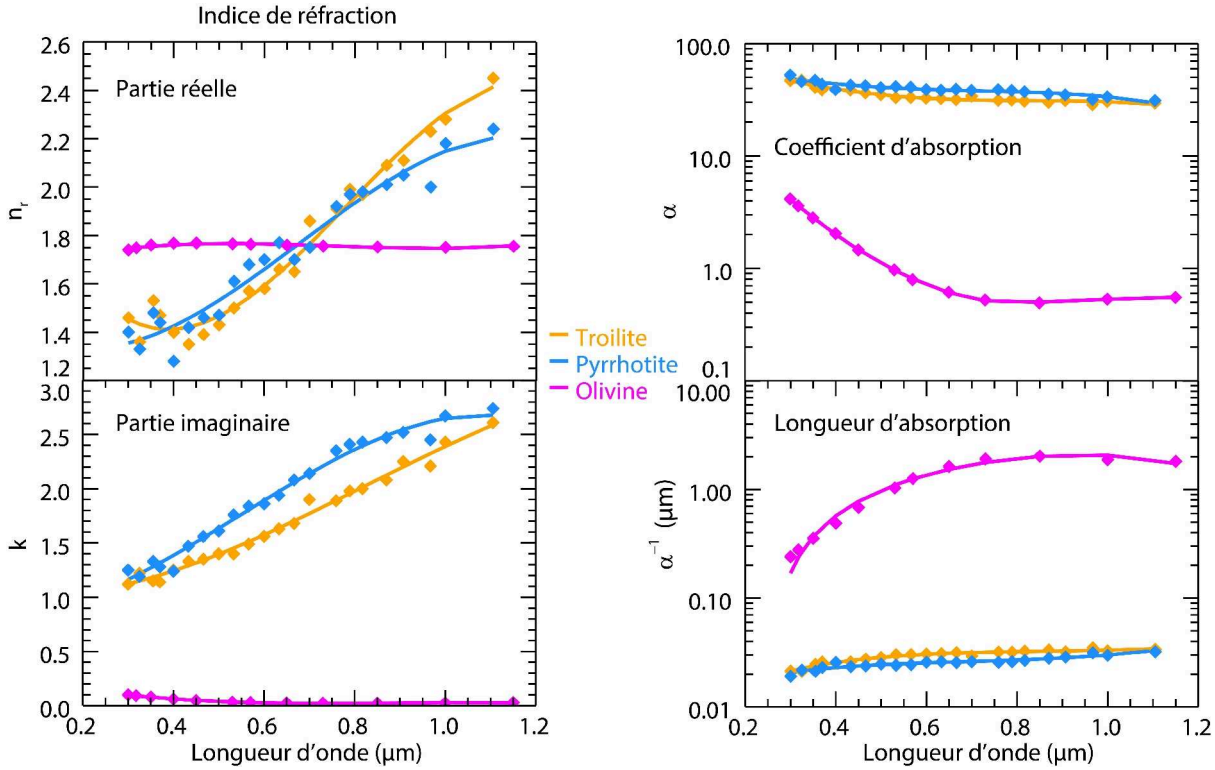


FIGURE 9.2 – Figures de gauche : parties réelles (n_r) et imaginaires (n_i) des indices de réfraction (ou constantes optiques) de la troïlite (FeS), de la pyrrhotite ($Fe_{1-x}S$) et de l'olivine ($(Fe_0 \cdot 3\,Mg_0 \cdot 7)\,SiO_4$). Troïlite et pyrrhotite d'après les données de Egan and Hilgeman (1977) ; olivine d'après Pollack et al. (1994) (base de données JPDOC). Figure de droite : coefficient d'absorption et longueur d'absorption de ces mêmes matériaux. La longueur d'absorption correspond à un facteur d'atténuation de l'intensité de e. Les données expérimentales sont représentées par des symboles, les lignes sont des courbes d'allures polynomiales.

indiquant une faible absorption pour l'olivine à l'inverse des sulfures de fer dans ce domaine spectral. Ce comportement est traduit par le coefficient d'absorption et de façon plus parlante par la longueur d'absorption : le parcours optique avant une atténuation importante est beaucoup plus court dans le cas des sulfures de fer (quelques dizaines de nanomètres) que dans le cas de l'olivine (quelques centaines de nanomètres à quelques microns).

En optique géométrique, on décrit les régimes de diffusion comme suit :

— La diffusion en surface signifie que la majorité de la lumière est réfléchie au premier dioptre qu'elle rencontre et donc à la surface des grains, là où elle subit la première réflexion. Ce cas est observé lorsque k est grand devant 1 ; dans cette situation la réflectance augmente si k augmente. C'est le cas des minéraux opaques ou des métaux par exemple (voir k pour la troïlite et la pyrrhotite dans la figure 9.2). Lorsque la taille des particules est grande devant la longueur d'onde, la réflectance ne dépend pas de leurs tailles à condition qu'elles soient lisses ; la présence d'aspérités ou de petites particules sur leur surface provoquera une réflectance plus faible, ces éléments jouant un rôle absorbant important (Hapke, 2012). Dans le régime de la diffusion en surface, diminuer la taille des grains provoque une diminution de la réflectance comme c'est le cas dans l'infrarouge (Vincent and Hunt, 1968).

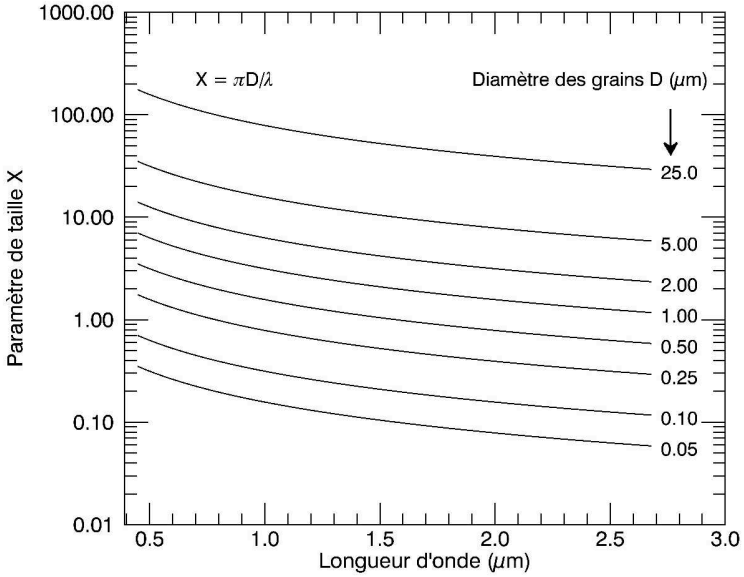


FIGURE 9.3 – Paramètre de taille en fonction de la longueur d'onde et de la taille de grain propres à l'expérience. Les régimes balayés sont celui de Mie ($X \sim 1$) et celui de l'optique géométrique ($X \gg 1$).

— Dans le régime de la diffusion en volume les photons pénètrent dans les grains, subissant la réfraction et des réflexions internes. L'absorption a lieu si k n'est pas négligeable et en raison de la présence de diffuseurs internes, dans le grain (irrégularités de la maille cristalline etc...). Avant de reprendre le chemin vers l'extérieur et potentiellement vers les yeux de l'observateur, les photons ont donc pour la plupart traversé au moins un grain avant de subir une réflexion à l'intérieur s'ils n'ont pas été absorbés. Dans ce régime, 1) la réflectance augmente si k diminue (Hapke, 2012) et 2) selon le domaine spectral, diminuer la taille des grains conduit à une augmentation de la réflectance et à une diminution du contraste spectral (les bandes d'absorptions sont moins visibles) (Adams and Filice, 1967). Ce comportement peut être observé pour les minéraux comme l'olivine (Mustard and Hays, 1997) ou le pyroxène (Clark, 1999), pour du basalte et de l'anorthosite (Le Bras and Érard, 2003), de la glace d'eau (Clark and Roush, 1984) ou pour les charbon comme on le voit dans Quirico et al. (2016) et cette étude. Ce régime de diffusion est valable pour les matériaux peu absorbants, c'est à dire dont la partie imaginaire de l'indice de réfraction est petite devant 1 (c'est le cas de notre olivine ici).

La plupart des études des dernières décennies se situent dans le cadre de l'optique géométrique. Les raisons sont à la fois d'ordre technique : la fabrication de micro et nanoparticules est difficile ; mais aussi scientifique : la plupart des régolites planétaires ont des tailles de grains micrométriques à millimétriques (environ 60 µm pour le régolithe lunaire par exemple).

Après que Maxwell eut posé dans la seconde moitié du XIXème les bases de l'électromagnétisme à travers ses fameuses équations, Gustav Mie publia en 1908 une étude sur la diffusion de la lumière par des nanoparticules d'or en solution (Mie, 1908), et donc hors de ce cadre théorique puisque les particules sont alors du même ordre de grandeur que la longueur d'onde de la lumière utilisée. Il proposa plusieurs solutions à ce problème complexe, mais valable pour des particules sphériques et isolées (séparées d'environ trois rayons les unes des autres). Ce n'est qu'au cours du XXème siècle que des études ont montré

que la théorie de Mie s'accordait relativement bien avec des milieux particulaires. Pour des travaux plus réalistes considérant des particules autres que sphériques et isolées, des modèles basés sur l'équation du transfert radiatif dont le formalisme a été développé par Chandrasekhar (1960) sont utilisés (voir Claustres (2000) pour une synthèse des modèles existants, et Souchon et al. (2011); Fernando (2014); Andrieu et al. (2015); Andrieu et al. (2015) pour des cas d'applications en planétologie). L'objet ici est de décrire très simplement les différents régimes de diffusion et de comprendre pourquoi les petites tailles de nos particules impliquent de considérer la théorie de Mie (pour étudier la question en détails le lecteur est renvoyé vers le livre de van de Hulst (1957) et vers les études de Moersch and Christensen (1995); Mustard and Hays (1997) qui utilisent pour ces derniers un modèle hybride Hapke-Mie).

Le paramètre de taille X, adimensionné, qui dépend du diamètre de la particule D et de la longueur d'onde λ, permet justement d'évaluer le domaine d'application dans lequel on se situe en théorie :

$$X = \frac{\pi D}{\lambda}$$

— Lorsque $X \ll 1$, les particules sont très petites devant la longueur d'onde. Cette situation est un cas limite de la théorie de Mie mais connu puisque c'est le régime de la diffusion de Rayleigh, qui se fait par exemple sur des molécules. Il est démontré que la diffusion se fait proportionnellement à $1/\lambda^4$.

— Lorsque $X \sim 1$, les particules et la longueur d'onde en jeu sont du même ordre de grandeur. Nous sommes dans le régime de Mie, ou de résonance. Pour des sphères parfaites et peu absorbantes $(k \ll 1)$, un phénomène d'interférences constructives et destructives lié à la diffraction provoque une oscillation de l'efficacité de la diffusion en fonction de $(n_r - 1) \times X$. Dans le cas de particules absorbantes, irrégulières et/ou si la distribution en taille est continue, ces interférences sont fortement réduites. Si $k < 1$ alors la dépendance entre X et la réflectance est complexe et celle-ci dépend plus de k. Mais pour $k \ll 1$, la réflectance est alors décroissante en fonction de la longueur d'onde pour une taille de particule donnée. C'est ce dernier cas qui nous intéresse.

— Enfin, si $X \gg 1$, les particules sont grandes devant la longueur d'onde et nous nous trouvons dans le régime de l'optique géométrique évoqué précédemment. La diffraction peut contribuer à la diffusion quand $X \gg 1$, cependant comme indiqué plus tôt, elle est négligeable dans un milieu où les diffuseurs sont en contact proche.

La figure 9.3 donne une idée des valeurs que prend le paramètre de taille dans les expériences présentées dans le chapitre 8. Huit tailles de grains allant de 50 nm à 25 µm sont données, ce qui correspond aux tailles présentes dans les mélanges broyés avec le broyeur planétaire et tamisés à 25 µm. On remarque que les régimes qui nous concernent sont ceux de Mie et de l'optique géométrique, le régime de Rayleigh n'est jamais atteint car nécessitant des tailles bien trop petites. Nous discuterons des implications dans la section suivante.

9.2 Phases pures - Effets de la taille des grains

9.2.1 Dunite

La dunite est majoritairement composée d'olivine qui possède un coefficient d'absorption relativement faible en infrarouge proche. De nombreuses études (Adams and Filice, 1967; Mustard and Hays, 1997; Clark, 1999; Cooper and Mustard, 1999) font part de l'évolution de la réflectance en fonction de la taille des grains pour un tel composé ou pour des matériaux possédant à peu près les mêmes propriétés optiques (les pyroxènes par exemple). Dans le cadre de l'optique géométrique et dans le domaine spectral étudié ici c'est la diffusion en volume qui opère en infrarouge proche, il est observé que la réflectance diminue lorsque la taille des grains augmente pour des tailles relativement grossières (de 45 µm à 2000 µm, figure 9.4). Au fur et à mesure que la taille des grains augmente, le photon qui les traverse a de plus en plus de chance d'être absorbé. C'est pourquoi le continuum diminue et la profondeur de la bande d'absorption principale de l'olivine augmente. On note toutefois qu'à partir d'une certaine taille, dite optimale, la bande d'absorption de l'olivine ne peut plus se creuser, elle est saturée.

Les mesures réalisées dans les expériences de cette étude et exposées dans la figure 8.6 page 177 ne montrent pas ce comportement. En effet, on observe que la réflectance diminue entre les échantillons originaux et ceux broyés avec le broyeur planétaire, que ce soit pour la dunite 1 (traits pointillés) ou pour la dunite 2 (traits pleins). On voit aussi que le contraste spectral des bandes d'absorption est plus faible. Une dernière caractéristique marquante est le bleuissement des spectres observé également pour les deux dunites.

On sait d'après les images MEB (7.21 page 169) que la dunite 1 (et sans aucun doute la dunite 2) passée au broyeur planétaire présente des tailles de quelques centaines de nanomètres. D'après le diagramme 9.3 on trouve pour ces tailles et pour les longueurs d'onde étudiées que le paramètre de taille est proche de l'unité, nous indiquant que l'on ne se trouve pas dans le cadre de l'optique géométrique. Ces observations semblent indiquer que l'on se trouve dans le régime de Mie, peu contraint et peu étudié expérimentalement mais pour lequel on ne retrouve pas les mêmes comportements spectraux que dans l'optique géométrique. Notamment, comme évoqué précédemment, on s'attend à une diminution de la réflectance avec la longueur d'onde croissante. Soit un bleuissement des spectres.

Ces observations sont renforcées par l'étude théorique de Brown (2014) sur le bleuissement causé par des petites particules et par celles, expérimentales, de Poch et al. (2016b) (et communications personnelles, 2017) qui observent ce comportement pour certains résidus de sublimation très poreux de smectite et de tholins de l'ordre du micromètre et inférieur.

Ainsi, malgré la présence d'agrégats, ce sont bien les plus petits constituants des échantillons qui imposent le comportement spectral final. La différence de réflectance observée entre les spectres D et E est délicate à interpréter car même si ces deux échantillons se caractérisent par l'absence et la présence d'agrégats, ils restent tous les deux constitués de ces mêmes petites particules micro et submicrométriques. Il est donc possible que les agrégats tels que nous les avons définis dans cette étude n'influencent pas le spectre et que la différence observée dans la figure 8.6 page 177 soit simplement dû à la mesure (orientation de l'échantillon, homogénéité dans le champ de vue...).

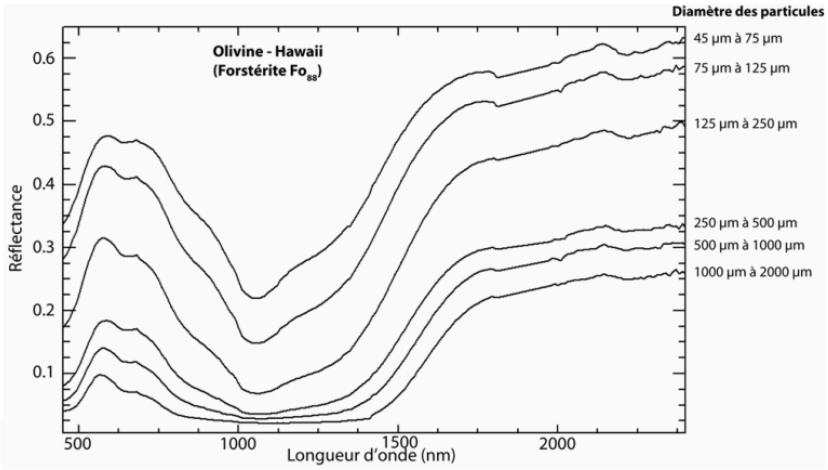


FIGURE 9.4 – Réflectance de poudres d'olivines grossières nous plaçant dans le cadre de l'optique géométrique. Adapté de Clénet et al. (2011); Ody (2012).

9.2.2 PSOC 1532

Nous disposons d'un échantillonnage en taille suffisamment important pour étudier le comportement spectral du PSOC 1532 selon ce paramètre. Les mesures réalisées par Quirico et al. (2016) pour des tailles allant de 560 µm à moins de 25 µm (figure 8.1) indiquent une augmentation de la réflectance avec la diminution de la taille de grain aussi bien dans le visible – où le matériau est très absorbant – que dans l'infrarouge proche – où il l'est moins. Les spectres et les images réalisées à la binoculaire sur des grains grossiers semblent indiquer que la réflexion en surface est sans doute le processus dominant dans le visible. C'est ce qui donne l'aspect opaque et réfléchissant aux grains grossiers de PSOC 1532 à l'œil nu (photo D de la figure 8.3). Dans l'infrarouge le PSOC 1532 est moins absorbant que dans le visible et c'est la diffusion en volume qui prend le dessus de celle de surface. L'écart est de plus en plus marqué par rapport au visible lorsque la taille de grain augmente.

Concernant les caractéristiques physiques des poudres réalisées au broyeur planétaire, la situation est identique à celle de la dunite. La taille des grains et la valeur du paramètre X est identique à la dunite et le régime valide pour $X \sim 1$ est valable. Pourtant, contrairement à cette dernière, les échantillons passés au broyeur planétaire et dont les grains sont plus petits présentent une réflectance plus importante que les échantillons dont les grains sont plus gros. C'est donc le comportement inverse qui est observé par rapport à la dunite. En l'absence des constantes optiques du matériau, il est cependant difficile d'interpréter ces observations. Les propriétés optiques du PSOC 1532 sont suffisamment différentes pour que l'évolution de la réflectance ne suive pas la même règle que pour la dunite.

Dans les échantillons C, D, E de la figure 8.2 on trouve des grains de quelques dizaines à quelques centaines de microns. Le paramètre de taille indique que c'est l'optique géométrique qui s'applique pour eux. Cependant, ces échantillons possèdent en leur sein des particules plus petites pour lesquelles X est proche de l'unité, et donc indique que c'est le régime de résonance qui prévaut. À nouveau, l'interprétation de tels mélanges est délicate mais on remarque principalement que les spectres C et D possèdent des réflectances de l'ordre des échantillons de 200 à 560 µm de la figure 8.1. Ces deux échantillons C et D semblent donc dominés par les grosses tailles de grains à l'inverse des matériaux clairs. Ces tailles

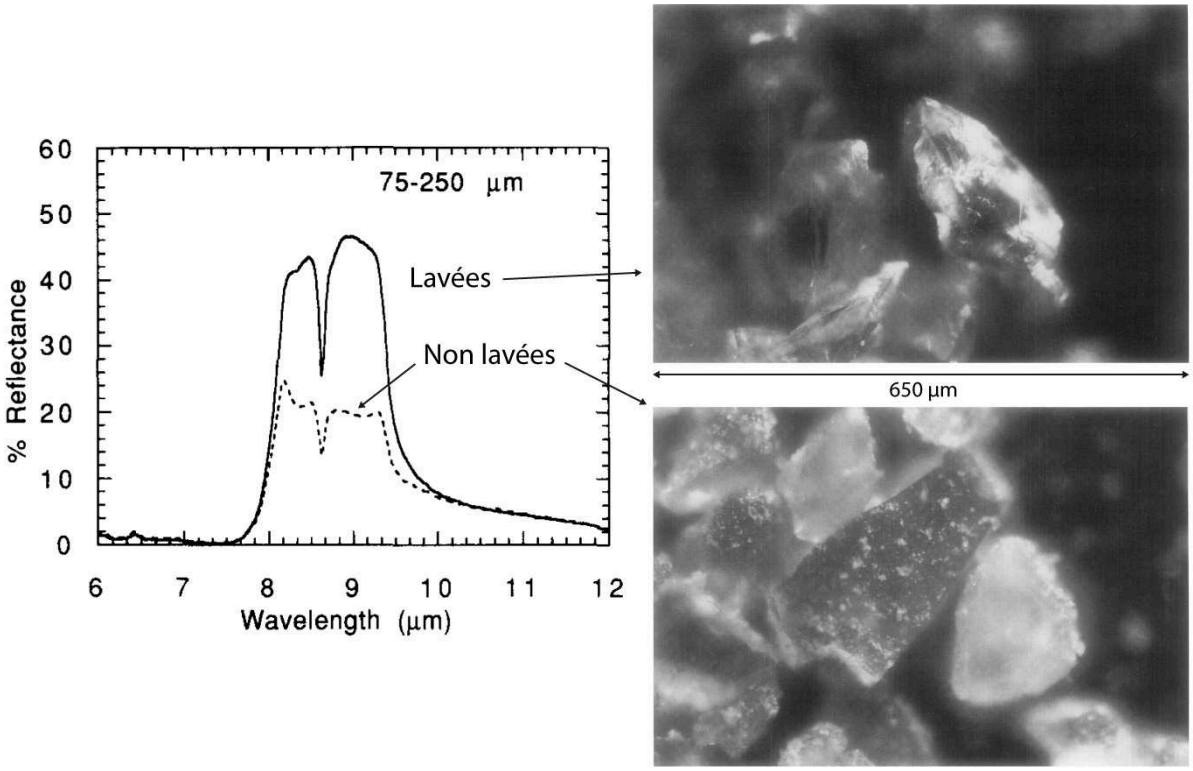


FIGURE 9.5 – Influence spectrale (à gauche) de petites particules de quartz présentes sur de plus grosses de 75-250 µm (à droite). Adaptés de Salisbury and Wald (1992).

peuvent dépasser les 200 µm et induisent une absorption importante dans le cadre de la diffusion en volume. Ce n'est plus le cas de l'échantillon E qui présente un spectre plus clair que les deux précédents. Dans cet échantillon, la proportion de petite particules est plus importante et les gros grains sont limités en taille à 200 µm. L'absorption est non seulement réduite mais la présence des petites particules permet de masquer en partie les grosses particules, augmentant d'autant plus la réflectance. Ce phénomène semble nécessaire lorsque l'on compare le spectre de l'échantillon E avec celui de taille ≤ 25 µm de l'étude de Quirico et al. (2016) présent sur la figure 8.1 puisqu'ils sont en effet du même ordre de grandeur.

Le recouvrement ou la présence de petites particules sur de plus grosses a déjà été observé à travers différentes études : Aronson and Emslie (1973) et Salisbury and Wald (1992) montrent qu'ils peuvent avoir une influence spectrale non négligeable (voir figure 9.5) en agissant comme des diffuseurs efficaces. Cette influence n'a pas pu être testée ici car les échantillons de ces expériences et celles de Quirico et al. (2016) n'ont pas été lavés (ce qui aurait permis de retirer les petites particules) mais simplement tamisés.

Un autre aspect pouvant jouer un rôle important dans la réflectance des poudres, et dans notre cas plus particulièrement pour l'échantillon A de la figure 8.6, est la structure même de l'échantillon, et donc indirectement les propriétés du matériau (sa cohésion notamment). Par exemple la taille des agrégats et la compacité du milieu peuvent jouer en faveur ou en défaveur de ces paramètres. De tels effets ont déjà été remarqués dans des études précédentes, notamment pour des structures très aérées. Dès 1963, dans le premier article d'une longue série sur le fameux modèle de Hapke, Hapke and van Hoen (1963) évoquent

le cas des structures en « *fairy castle* » - littéralement en « château de fée ». Salisbury and Wald (1992), en étudiant différent matériaux font également part de ce type d'arrangement au sein d'échantillons. Des photos de telles structures sont données dans la figure 9.6. On pourra toujours remettre en question les gouts architecturaux des fées mais force est de constater que l'on retrouve pour notre PSOC 1532 broyé finement, tamisé, séché puis écrasé au mortier pour se débarrasser des agrégats, le même genre de structures, très aérées, que les échantillons de Hapke and van Hoen (1963), Salisbury and Wald (1992) mais aussi Schroder et al. (2014). D'après Hapke and van Hoen (1963), les grains dans ce type de structure sont en contact avec très peu de leurs voisins (un, deux, quelques-uns tout au plus) et c'est principalement les forces de van der Waals qui les lient. Si les grains sont chargés, ce qui est le cas du PSOC 1532 étant donné son comportement vu au microscope au passage d'un objet conducteur, les forces électrostatiques peuvent également jouer un rôle dans le maintien de la structure mais également pour la formation de celle-ci lorsqu'elle se forme par dépôt. Une taille critique (que Hapke and van Hoen (1963) estiment être autour de 15 µm en laboratoire, et donc dans les conditions de gravité et de pression terrestre) semble applicable pour permettre la formation de *fairy castle*, au-délà le grain est trop lourd et sa vitesse d'impact sur la surface conduira à la formation d'un échantillon plus compact. Ce raisonnement est valable dans le cas d'une formation par dépôt/sédimentation, ce qui n'est pas le cas de nos échantillons. Il est dès lors étonnant de retrouver une structure similaire. Cela montre éventuellement que la formation par dépôt n'est pas le seul processus possible.

Quoiqu'il en soit, bien que la photométrie n'ait pas été explorée dans cette étude, il est intéressant de souligner que Hapke and van Hoen (1963) constatent que leurs échantillons très poreux présentent une forte diffusion vers l'arrière (« backscattering »). Cela est dû au fait que la lumière peut pénétrer depuis n'importe quelle direction et profondément (relativement à la profondeur de pénétration dans une surface bien sûr) dans une structure très poreuse. Les photons qui éclairent les zones les plus lointaines peuvent, après réflexion, revenir sur leur chemin et contribuer à cette composante de diffusion en arrière, tandis que les autres seront réfractés ou réfléchis dans d'autres direction (Hapke and van Hoen, 1963). C'est ce même phénomène qui conduit à l'effet d'opposition à de petits angles de phase. Salisbury and Wald (1992) constatent le même phénomène et Schroder et al. (2014) observe que la réflectance d'échantillons formant ces structures est plus élevée que d'autres échantillons de tailles plus importantes.

Alors que les tailles de grains atteintes pour les échantillons A et B sont de l'ordre du micron et inférieures et que le régime théorique de diffusion est celui de Mie, on voit que d'autres paramètres comme la structure de l'échantillon et les forces qui lient les particules entre elles peuvent entrer en jeu (en plus de l'absence d'atmosphère qui joue un rôle important dans la texture du régolithe et qui n'a pas été évoquée). Le protocole suivi pour les élaborer et leur caractérisation sera d'autant plus important dans ces situations.

9.2.3 Pyrrhotite

En considérant dans un premier temps uniquement les échantillons passés au broyeur planétaire (spectres A, B et C de la figure 8.5 page 176), on remarque que les particules les plus fines, qui sont plus nombreuses, dominent spectralement : le spectre C, dont l'échantillon contient des grains de plusieurs di-

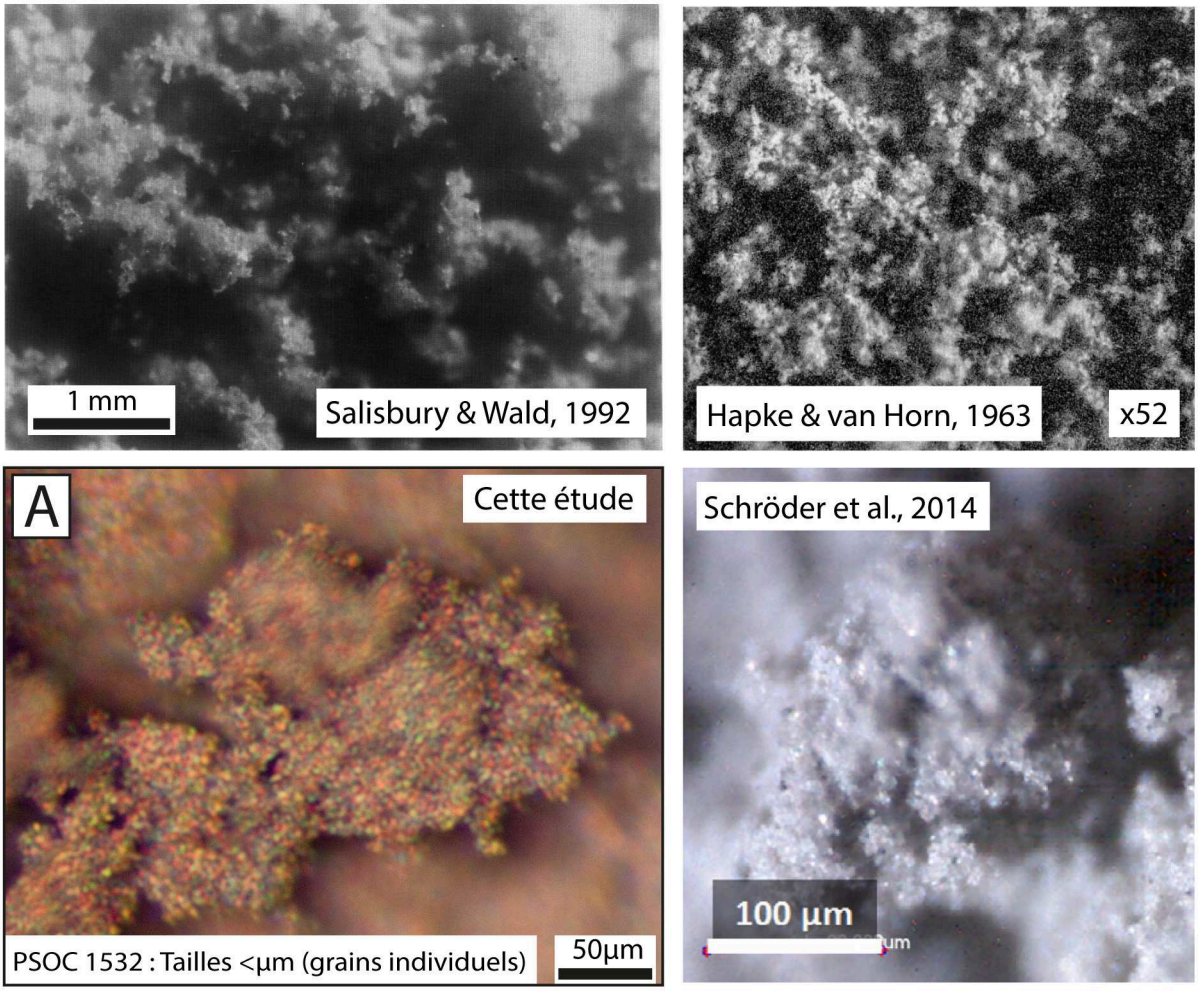


FIGURE 9.6 – Structure en « château de fée » (*« fairy castle »*) pour différents échantillons broyés très finement : en haut à gauche, il s'agit de quartz, en haut à droite de ciment, en bas à gauche du PSOC 1532 issue de cette étude et en bas à droite de basalte.

zaines à plusieurs centaines de microns et donc très brillants individuellement, possède ainsi une réflectance égale à l'échantillon B qui ne possède que des grains micro et nanométriques. Autre détail intéressant, l'échantillon A possède lui aussi une réflectance globale du même ordre de grandeur tandis qu'il a été préparé de la même façon que les échantillons de PSOC 1532 et de dunite contenant des agrégats. Après inspection à la binoculaire, on voit que la pyrrhotite ne forme en réalité presque aucun agrégats. Elle ne réagit pas non plus, ou moins, au passage d'un outil métallique, contrairement au PSOC 1532. Les grains individuels sont moins liés les uns aux autres, évitant la formations d'agrégats et conduisant à des échantillons A et B identiques spectralement. Pour le cas de l'échantillon C, la photo binoculaire de la figure 8.5 semble indiquer que les gros grains sont recouverts de petites particules de pyrrhotite, supprimant ainsi les éventuelles réflexions spéculaires qu'ils pourraient engendrer.

En prenant en compte l'ensemble des échantillons représentés sur la figure 8.5, on constate que plus la taille des grains est fine, plus la réflectance est faible. Ce comportement a déjà été observé pour des minéraux opaques similaires à la pyrrhotite, comme la troïlite (FeS) (Britt et al., 1992) ou pour des surfaces de météorites ferreuses (avec des proportions variables de Fe-Ni) poncées ou réduites en

poudres (Britt and Pieters, 1988; Cloutis et al., 2010, 2015). On évoquera également les travaux de Britt and Pieters (1988) qui mesurent en réflectance la surface de météorites ferreuses poncées avec différents grains de papiers à poncer, reproduisant ainsi une rugosité que l'on peut apparenter à une taille de grain équivalente. Trois groupes, mesurés entre 0.5 µm et 1.8 µm en géométrie spéculaire et non spéculaire, sont distingués :

— Le groupe I possède des aspérités comprises entre 10 µm et 1 mm. Il présente des pentes rouges et une réflectance importante dans les deux géométries, correspondant à une réflectance dite diffuse car non dépendante de la géométrie et semblable au spectre intégré sur plusieurs géométries de plusieurs météorites.
— Les aspérités du groupe II sont comprises entre 0.7 µm et 10 µm et est intermédiaire aux groupes I et III. Les aspérités et la longueurs d'onde sont du mêmes ordre de grandeur, conduisant à des comportements spectraux complexes.
— Le groupe III présente des aspérités inférieures à 0.7 µm et possède des caractéristiques similaires au groupe I en géométrie spéculaire mais son spectre est très plat et sombre lorsqu'il est mesuré en géométrie non spéculaire, on distingue ici les deux composantes : spéculaire et diffuse.

D'après Britt and Pieters (1988), les mesures du groupe III suggèrent que l'information spectrale est uniquement acquise dans une géométrie spéculaire. En effet, dans un métal, le rayonnement ne pénètre que dans ce qui est appelé la profondeur de peau. Il y a donc interaction en surface mais celui-ci ne pénètre pas ou très peu, il y a réflexion ou absorption mais pas transmission. Britt and Pieters (1988) donnent ainsi la profondeur de peau du cuivre comme égale à 0.016 µm à 0.19 µm d'après Wooten (1972).

Le groupe I de Britt and Pieters (1988), du fait de sa rugosité importante, peut être considéré comme similaire à de nombreuses facettes disposées aléatoirement. Ici, la taille des facettes est grande devant la longueur d'onde et la composante diffuse de la réflexion domine largement : la probabilité d'avoir une réflexion spéculaire, c'est à dire que l'angle d'incidence soit égale à l'angle d'émission, est inférieure à 0.1%. Pour autant, on observe les caractéristiques d'une réflectance spéculaire, similaire à celle du groupe III dans cette géométrie spécifique uniquement. L'énergie focalisée lors d'une réflexion spéculaire est telle qu'il suffit d'une très faible proportion de facettes orientées dans cette géométrie pour contribuer au signal et apporter l'information spectrale prédite par la théorie dans le cas des métaux (théorie de Drude) et plus généralement dans le cas des matériaux aux indices de réfractions imaginaires k élevés, à savoir une pente rouge et une réflectance élevée. Britt and Pieters (1988), partant de ces constats, simulent un mélange par combinaison linéaire d'un spectre acquis en géométrie non spéculaire, plat et de faible réflectance, avec un spectre acquis en géométrie spéculaire possédant une forte réflectance et rouge. Malgré les 99.99% de « composé non spéculaire » et les 0.01% de « composé spéculaire » c'est bien ce dernier qui domine et le spectre obtenu est similaire au spectre moyen des quatre météorites utilisé dans l'étude présentant une réflectance globale importante et une pente rouge (voir figure 9.7).

On sait que la réflectance de la pyrrhotite, à des tailles de grains relativement importantes par rapport à la longueur d'onde et dans le cadre de l'optique géométrique donc, est régit par la diffusion (ou réflexion) en surface. En théorie, si l'indice optique imaginaire k augmente, la réflectance augmente. De plus, elle ne dépendra pas de la taille des grains (Hapke, 2012). Pour autant, l'étude de Britt and Pieters (1988) est intéressante vis à vis des expériences décrites ici et bien que la situation soit légèrement différente

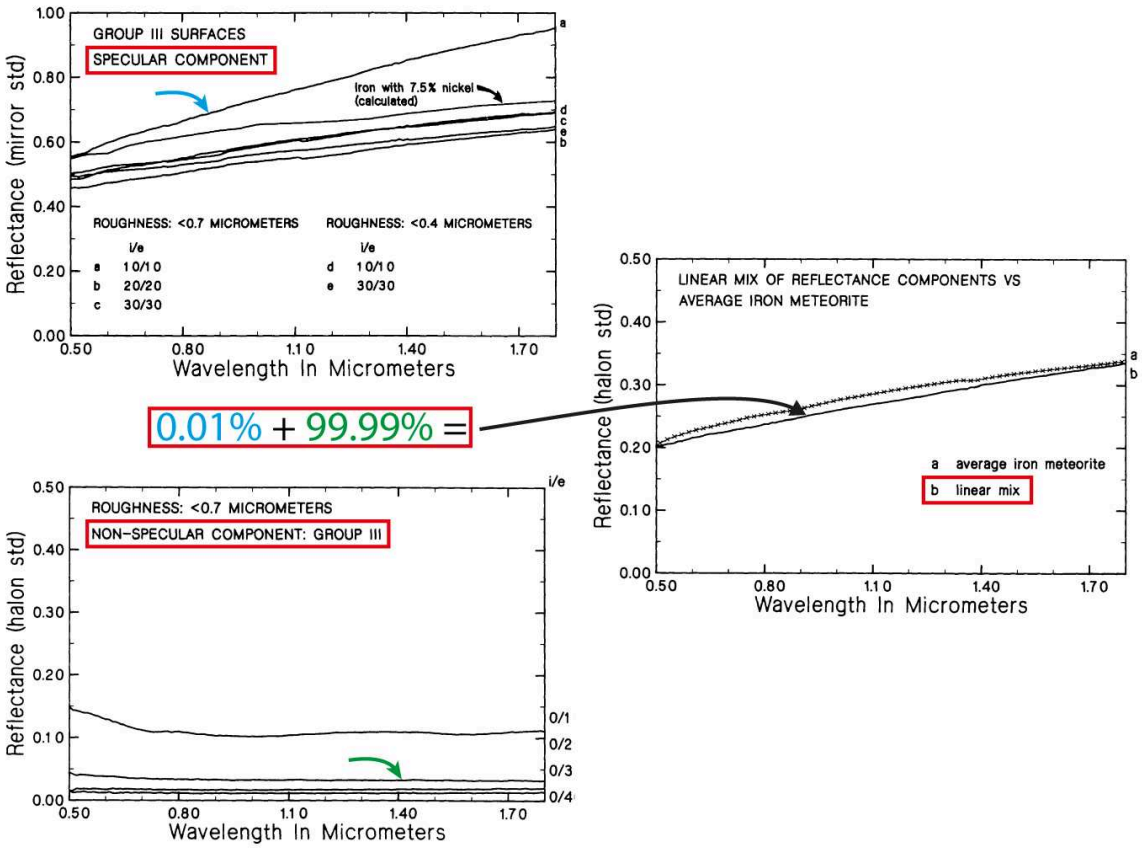


FIGURE 9.7 – Schéma illustrant un mélange linéaire entre deux spectres de la météorite ferreuse de Canyon Diablo et dont les géométries d'acquisition sont différentes. En bleu géométrie spéculaire conduisant à un spectre brillant et rouge caractéristique des surfaces métalliques. En vert géométrie non spéculaire présentant un spectre plat et sombre. La combinaison des deux montre que la composante spéculaire domine le résultat même en très faible quantité. Adapté de Britt and Pieters (1988).

dans le cas de nos poudres de pyrrhotite. Contrairement aux métaux, les minéraux opaques possèdent une composante transmise de la lumière incidente, bien que celle-ci soit absorbée très rapidement. Cependant, les explications de Britt and Pieters (1988) décrites précédemment peuvent être appliquées à nos tailles de grains les plus grosses, pour les échantillons D, E, F et G broyés à la mains et > 25 µm. Dans ces échantillons, une majorité de la réflexion sera également de type diffuse, comme le groupe I de Britt and Pieters (1988), mais une proportion minoritaire de facettes de grain sera dans une géométrie de type spéculaire, capable d'acquérir et de renvoyer par réflexion l'information spectrale au détecteur. Nos mélanges ont ainsi effectivement une pente rouge et une réflectance élevée.

Bien que la théorie veuille que la réflectance ne varie pas avec la taille de grains lorsque $X \gg 1$ il est intéressant de constater que les échantillons de tailles pluri-micrométriques D, E, F, G de la figure 8.5 présentent des variations. Dans les échantillons de la présente étude, les tailles 100-200 µm et 50-100 µm (échantillons F et G) ont ainsi les mêmes valeurs de réflectance. De même pour les tailles 25-50 µm et $<$25 µm qui sont dans le même ordre de grandeur. Une évolution très progressive du même type que celle observée pour le PSOC 1532 n'est ici clairement pas retrouvée. Ce constat est le même dans les études précédemment citées : Britt et al. (1992) observent la même tendance pour la troïlite avec tout de même aussi un écart plus marqué entre les tailles supérieures et inférieures à 25 µm. On voit

dans ce cas, représenté figure 9.8, que les échantillons 125-250 µm et > 250 µm ont des réflectances plus faibles que les trois autres échantillons broyés plus finement. *Cloutis et al. (2010) et Cloutis et al. (2015)* observent également ces évolutions plus ou moins erratiques avec des poudres de météorites ferreuses. L'explication simple pour comprendre cela fait appel à la façon dont Britt and Pieters (1988) décrivent leur groupe I (voir ci-dessus) : à savoir un ensemble de facettes orientées aléatoirement. C'est cet aspect aléatoire qui peut jouer en faveur ou en défaveur d'une plus ou moins grande quantité de grain orientés de façon à permettre une réflexion spéculaire. Dans toutes les tailles étudiées par les études citées ci-dessus, les grains sont plus gros que la longueur d'onde de la lumière incidente, les surfaces de grains exposent une surface importante et les réflectances observées sont grandes. Au-delà de la nature de l'interaction avec ce type de surface, c'est donc l'orientation des grains qui peut avoir une grande importance, conduisant, du fait de son caractère aléatoire, à une variation de la réflectance selon non pas la taille des grains dans un premier temps mais plutôt de l'orientation des facettes de ces grains.

Pour autant, on remarquera que dans nos échantillons les plus gros, de même que dans ceux de Britt et al. (1992), ce sont ceux qui possèdent les tailles de grains les plus faibles qui présentent la plus petite réflectance. La question se pose donc tout de même de la dépendance de la réflectance vis à vis de la taille de grains. Cette diminution, bien que mal définie et non attendue en théorie pour des grosses particules, pourrait être expliquée de plusieurs façons. Premièrement, on atteint ici une taille suffisamment petite pour que le cône de réflexion spéculaire soit extrêmement petit, diminuant ainsi la probabilité d'un tel évènement dans une géométrie quelconque. Deuxièmement, étant donné que c'est la réflexion en surface qui domine un tel matériau en raison de son k élevé, une analogie simpliste serait de comparer ces échantillons à un miroir que l'on casserait successivement en un nombre plus petit de morceaux : bien que la réflexion soit le processus dominant, plus les morceaux sont petits, plus la lumière a de chance d'être absorbé ou perdu après de multiples réflexions dans un milieu favorisant de moins en moins les géométries spéculaires. Ces deux mécanismes jouent en faveur d'une diminution de la réflectance lorsque la taille des grains diminue.

L'analogie entre l'étude de Britt and Pieters (1988) et la présente diffère en revanche avec les échantillons très fins broyés au broyeur planétaire. Tout d'abord, la comparaison ne peut pas être faite avec le groupe III même si le comportement spectral (spectre plat et faible en réflectance pour des géométries non spéculaires) est le même ; en effet, ce groupe correspond plutôt à une surface très lisse, sans aspérités, ce qui est le cas à l'échelle de nos grains individuels des échantillons D, E, F et G de la figure 8.5. Lorsque la taille des particules atteint environ l'ordre de grandeur de la longueur d'onde utilisée, ce qui est le cas pour les échantillons passés au broyeur planétaire, nous nous retrouvons encore une fois, comme pour la dunite et le PSOC 1532, dans le régime $X \sim 1$. Il n'est dès lors plus possible de faire appel à la diffusion en surface ou à une explication reliée à l'optique géométrique pour interpréter les observations. On observe simplement le même comportement que la dunite bien que les indices de réfraction sont radicalement différents (k est petit pour la dunite et grand pour la pyrrhotite) à savoir que la réflectance diminue avec la taille de grains. Alors que pour un ordre de grandeur supérieur la variation de la taille de grain n'avait une influence qu'indirecte sur la réflectance, ici, on observe que celle-ci diminue, de même que la pente rouge.

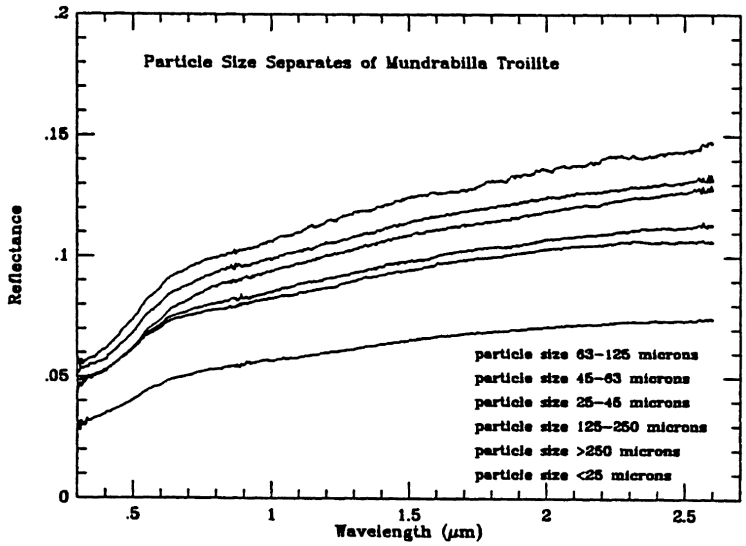


FIGURE 9.8 – Spectre en réflectance de poudres de troïlite avec différentes tailles de grains. Globalement, la réflectance diminue avec la taille de grain même si dans certain cas un échantillon plus fin peut montrer des réflectances plus importantes qu'un échantillon plus grossier. De Britt et al. (1992).

9.2.4 Conclusion sur les phases pures

Le broyage planétaire permet d'atteindre des tailles de grains pour lesquelles le paramètre de taille X est proche de 1. Cela implique un changement de cadre théorique pour expliquer la diffusion de la lumière par des particules qui sont du même ordre de grandeur que sa longueur d'onde. On passe alors pour les tailles de grains inférieurs à 1 µm à un régime de résonance, dit de Mie. Il a été testé dans ces expériences l'évolution de la réflectance en fonction de la taille de grains. On voit que selon les matériaux et leurs propriétés, le comportement n'est pas toujours le même. En l'absence d'indices optiques (principalement pour le PSOC 1532) il est cependant délicat de mener une interprétation précise des observations.

Pour pallier à cela, il serait intéressant de tester de manière plus contrôlée et plus systématique les effets de la taille de grains sur la réflectance pour des ordres de grandeur de l'ordre du micromètre et du nanomètre. Le tout pour des matériaux dont les propriétés optiques (indice de réfraction) seraient bien connus. Ceci rentre dans le cadre d'un autre travail puisque le but ici était de reproduire des poudres fines à des fins de mélanges.

On a vu également qu'en plus de la taille des particules, la structure de l'échantillon pouvait influencer la réflectance. C'est le cas pour le PSOC 1532 et ses structures très aérées en « *fairy castle* ». Dans une moindre mesure et même si l'effet reste difficile à interpréter c'est potentiellement le cas des agrégats, dans la dunite et dans le PSOC 1532. En plus des propriétés de cohésion (forces électrostatiques, de Van der Waals) du matériau, ce sont aussi les protocoles expérimentaux qui vont influencer cette structure (présence ou non d'agrégats), d'où l'importance de cette étape et de la caractérisation des échantillons.

9.3 Mélanges binaires micrométriques - Effets de la composition

9.3.1 Mélanges intimes

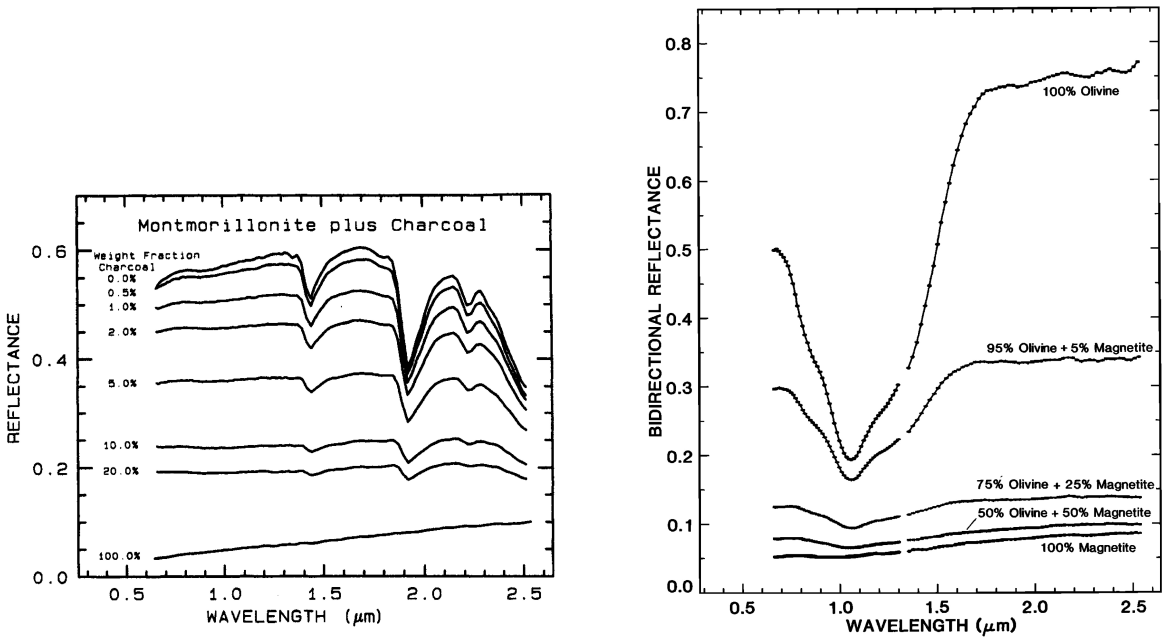
D'après les figures 8.8 (mélange A de PSOC 1532/dunite (1)), 8.10 (mélange B dunite/pyrrhotite (2)), 8.12a (mélange B PSOC 1532/pyrrhotite (3)) et pour les mélanges intimes :

1. Le mélange entre le PSOC 1532 et la dunite est le seul cas où l'influence de la dunite est présent, bien que faible. L'ensemble du spectre possède toutes les caractéristiques spectrales du PSOC 1532 (niveau de réflectance, pente, bande d'absorption). La dunite a un léger effet à partir de 1.5 µm en diminuant la réflectance mais n'impose pas ses bandes d'absorptions par exemple.
2. Le mélange intime dunite/pyrrhotite est similaire au spectre de la pyrrhotite et même légèrement bleu de façon inattendue. Ici, les 40% en masse de dunite ne sont absolument pas visibles spectralement.
3. Le mélange PSOC 1532/pyrrhotite n'est pas exactement similaire à la pyrrhotite pure et l'influence du PSOC 1532 se fait un peu ressentir, notamment dans le visible où la pente spectrale devient plus rouge que celle de la pyrrhotite seule et permet d'être en accord avec le spectre VIRTIS. Cependant, d'un point de vue du niveau de réflectance c'est bien la pyrrhotite qui domine encore une fois.

On voit que dans les trois cas c'est le composé le plus sombre qui domine le spectre. Ce type de résultats a déjà été mis en avant, notamment par Pommerol and Schmitt (2008) dans des mesures mettant en jeu une poudre de montmorillonite (minéral de la famille des smectites) broyée finement (< 25 µm) et d'anthracite (le PSOC 1532 1468 de la figure 7.7) de tailles variées . Il apparaît que l'anthracite, qui est plus sombre que la montmorillonite, a tendance à dominer le spectre rapidement et notamment à diminuer le contraste des bandes d'absorptions (figure 9.10). Pommerol and Schmitt (2008) montrent également que l'efficacité de cet assombrissement est d'autant plus grande que la taille des grains d'anthracite est petite. Clark (1999) montre également qu'en mélangeant un charbon de bois (*charcoal*) avec de la montmorillonite, le composé le plus sombre domine rapidement et produit les mêmes effets précédemment décrits (voir figure 9.9). C'est également le cas avec un mélange d'olivine et de magnétite (un minéral opaque) (Singer, 1981). Dans les deux cas cependant, les bandes d'absorptions restent visibles et leurs positions et leurs largeurs ne change pas, seul leurs profondeurs sont affectées (en plus du continuum).

Tandis que l'étude de Pommerol and Schmitt (2008) utilise des tailles de grains au mieux pluri-micrométrique (figure a.9.10) ou de taille plus importantes et différentes entre les deux composés (figures b.9.10 et c.9.10), la présente étude montre que la diminution de réflectance observée en mélangeant deux composés peux être obtenue avec des échantillons possédant la même taille, celle-ci étant par ailleurs de l'ordre du micromètre et inférieure. En revanche il est difficile de dire si cet effet est plus efficace dans notre cas car les matériaux sont différents et ne possèdent pas les mêmes propriétés optiques (bien que l'anthracite soit presque aussi sombre la pyrrhotite).

Alors que l'on sait que les plus petites particules sont les plus claires pour des matériaux comme les silicates (Adams and Filice, 1967), il en va de l'inverse pour des matériaux opaques (Britt et al., 1992). L'assombrissement par les petites particules de composés sombres du même ordre de grandeur que la



(a) Mélanges intimes de montmorillonite et de charbon de bois réalisés par Clark (1999).

(b) Mélanges d'olivine et de magnétite réalisés par Singer (1981).

FIGURE 9.9 – Mélanges permettant de visualiser l'impact du composé le plus sombre sur un composé plus clair. Le premier dominant rapidement les spectres.

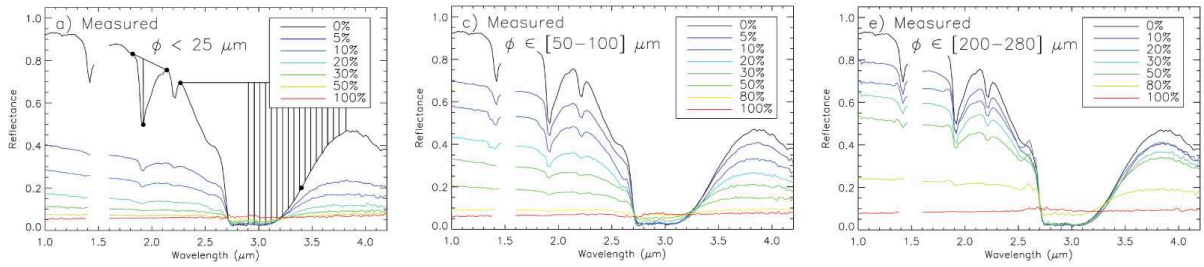


FIGURE 9.10 – Figures de Pommerol and Schmitt (2008) rapportant l'évolution de mélanges de tailles variées de montmorillonite avec une quantité croissante d'anthracite.

longueur d'onde vient du fait que les photons subiront beaucoup moins d'interactions avec les grains les plus clairs. Ce n'est pas le cas dans un mélange où les grains sont grands devant la longueur d'onde (optique géométrique), dans ce cas, la réflexion et la diffusion par le composé clair ne seront pas négligeables. C'est ce phénomène, typique des mélanges intimes, qui est observé ici.

9.3.2 Mélanges spatiaux et avec agrégats

Le mélange de PSOC 1532/dunite réalisé à l'agitateur mécanique (mélange B figure 8.8) est le seul à être de type « spatial », c'est à dire que l'on peut y observer visuellement les deux composés distinctement (voir photo de gauche 8.9). Dans ce cas, ils occupent des zones précises et, en théorie, la réflectance globale pour ce type d'échantillon résulte de la combinaison linéaire des réflectances de chaque matériau pur pondérée par la surface qu'ils occupent. Ici pourtant, le résultat n'est pas linéaire et comme

précédemment c'est le composé le plus sombre, le PSOC 1532, qui domine le mélange.

Cette observation, qui ne semble pas coller à la théorie, peut être expliquée par le fait que le mélange n'est spatial qu'en apparence. Il est possible qu'une partie de la dunite soit masquée par le PSOC 1532, soit en son sein dans des portions du mélange qui seraient de type intime, soit dans des agrégats de dunite recouverte de PSOC 1532, dans ce cas elle serait sous-représentée spatialement. Il est possible que l'échantillon soit suffisamment hétérogène pour que la majeure partie de l'échantillon éclairé et mesuré ait été du PSOC 1532, la dunite aurait également été sous-représentée lors de la mesure. Enfin, il est possible que les zones où la dunite est présente soient contaminées par du PSOC 1532. Dans ce cas, le PSOC 1532 jouant un rôle très absorbant, notamment les petites particules, domine en tant que composé plus sombre et empêche la dunite de jouer son rôle dans le mélange spatial. A l'inverse, que la dunite contamine le PSOC 1532 n'aurait pas d'incidence car les particules de dunite auront tendance à réfléchir et diffuser vers des particules de PSOC 1532 qui, elles, sont plus absorbantes. Cette dernière interprétation est cependant valable du visible jusqu'à 1.3 µm, c'est à dire jusqu'à ce que le PSOC 1532 soit plus absorbant que la dunite. Au-delà, l'interprétation quant à la domination du PSOC 1532 est moins simple car le PSOC 1532 possède une réflectance plus élevée que la dunite mais domine toujours dans le mélange, même si une légère influence de la dunite semble visible.

Les mélanges de PSOC 1532/pyrrhotite et de pyrrhotite/dunite (mélanges A des figures 8.12 et 8.10) sont de type « enrobage ». Comme cela a été décrit précédemment, le protocole utilisé pour réaliser les mélanges a préservé les agrégats de PSOC 1532 et de dunite qui, lors de l'agitation mécanique, ont été recouverts de pyrrhotite. Les deux mélanges présentent un aspect visuel dominé par la pyrrhotite. Spectralement, les deux spectres présentent des réflectances plus élevées que leurs homologues intimes. Pour le mélange pyrrhotite/dunite la pente spectrale est exactement la même que la pyrrhotite pure, seule la réflectance est environ 1.5 fois plus élevée que celle-ci et que le mélange intime. Pour le mélange PSOC 1532/pyrrhotite on retrouve une pente spectrale légèrement moins rouge dans le visible (respectant moins celle de VIRTIS) et légèrement plus rouge dans l'infrarouge (plus proche de VIRTIS). La réflectance, presque identique au mélange intime dans le visible est environ 1.2 fois plus élevée que ce dernier dans l'infrarouge.

Deux interprétations sont envisageables pour expliquer pourquoi les mélanges de type enrobage possèdent une contribution du PSOC 1532 et de la dunite augmentant leur réflectance tout en étant à l'état d'agrégats très bien recouverts de pyrrhotite. La première est qu'une faible quantité des photons arrivant à la surface de l'agrégat pénètre la couche de pyrrhotite et soit réfléchie et/ou diffusée par le composé interne (PSOC 1532 ou dunite). Dans cette situation, la couche de pyrrhotite doit être extrêmement faible pour pouvoir laisser passer ces photons « à l'aller et au retour », sans qu'ils soient absorbés par la pyrrhotite en surface. Après inspection au microscope, il semble très peu probable que ce soit le cas. Cette première hypothèse ne semble donc pas très fiable. La deuxième possibilité serait que certains agrégats ne sont pas totalement recouverts de pyrrhotite. Parce que le mélange n'a pas été parfaitement homogénéisé, ou parce que l'agrégat a perdu une partie de la pyrrhotite qui le recouvre, on a dans ce cas une partie du composé interne avec lequel les photons peuvent interagir. Ces cas ont été observés dans les mélanges de PSOC 1532/pyrrhotite et de pyrrhotite/dunite comme le montrent les photos 9.11.

Si ce deuxième phénomène est bien à l'œuvre, la réflectance du mélange est telle un mélange spatiale qui

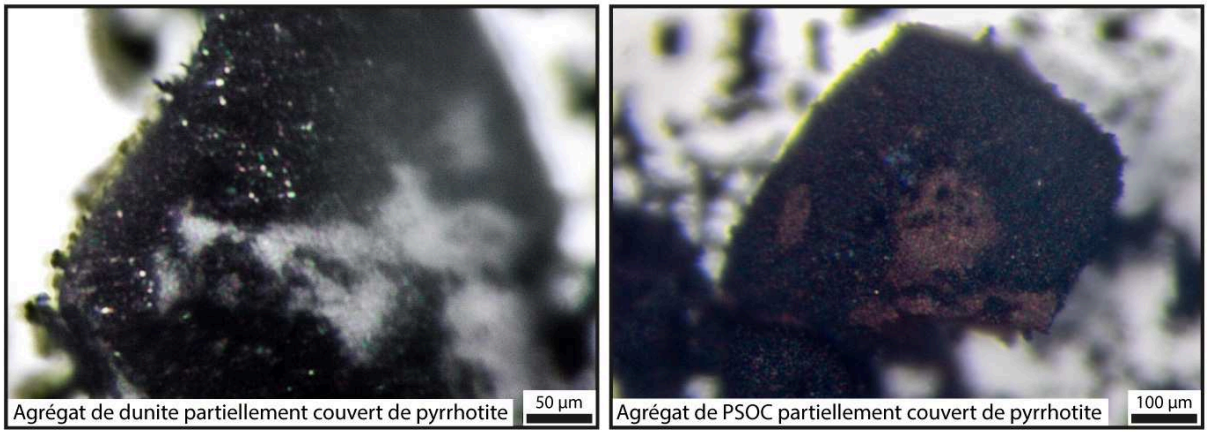


FIGURE 9.11 – Agrégats de dunite (à gauche) et de PSOC 1532 (à droite) partiellement recouvert de pyrrhotite. Un tel phénomène peut contribuer à modifier le spectre en réflectance en comparaison à un mélange intime (voir échantillons A et B des figures 8.12 et 8.10).

résulte de la combinaison des réflectances des deux phases pures pondérées de leur surfaces. Une rapide estimation permettant d'obtenir à peu près les mêmes valeurs de réflectances que les mélanges donne 0.02% de dunite ou de PSOC 1532 pour les deux mélanges concernés. Cependant, le résultat prouve une fois de plus que la composante la plus sombre domine le mélange. De plus, même s'ils peuvent être considérés comme spatiaux, les remarques précédemment évoquées sont également valables ici, notamment la contamination par la pyrrhotite des zones de PSOC 1532 et de dunite non totalement couvertes qui n'est pas à exclure. On voit donc qu'il est difficile d'évaluer l'efficacité de ce processus bien qu'il soit le plus probable.

9.3.3 Conclusion sur les mélanges binaires

L'ensemble des mélanges binaires ne donne pas de bons résultats lorsqu'ils sont comparés au spectre de 67P. Dans le meilleur des cas un bon ajustement existe dans le visible avec le mélange intime PSOC 1532/pyrrhotite. On retient cependant de ces mesures qu'un matériau très absorbant tel que la pyrrhotite est absolument nécessaire pour assombrir suffisamment le spectre à des niveaux similaires à ceux mesurés par VIRTIS. Si un minéral opaque est effectivement nécessaire, alors sa taille de grains doit être très fine, bien en dessous de 25 µm et même de l'ordre du micromètre et inférieur. Sans pyrrhotite, un mélange de PSOC 1532 et de dunite seul ne permet pas d'obtenir un mélange sombre étant données leurs caractéristiques spectrales.

Concernant les agrégats, la pyrrhotite n'en formant pas, contrairement au PSOC 1532 et à la dunite, il n'est pas étonnant de la voir recouvrir ces structures. Cependant, alors que le PSOC 1532 et la dunite ne se recouvrent pas mutuellement, la pyrrhotite est très efficace pour cela et les premières inspections à la binoculaire semblaient trompeuses car les agrégats de PSOC 1532 et de dunite n'étaient absolument pas visibles. Ce genre de phénomènes peut être intéressant à étudier dans le cas d'une surface planétaire ou cométaire où des agrégats pourraient se former mais on voit aussi qu'ils pourraient passer inaperçu.

Une différence spectrale est observée entre les mélanges intimes et ceux contenant des agrégats. Ces

derniers présentent une réflectance globale plus importante qui peut être expliquée par une couverture partielle des agrégats, conduisant le matériau interne à contribuer au signal par le biais de diffusions et de réflexions plus efficaces que pour la pyrrhotite qui les recouvre.

9.4 Mélanges ternaires micrométriques - Effets de la composition dans les mélanges intimes et avec agrégats

Les mélanges ternaires composés de grains micrométriques ne sont pas équivalent au spectre de 67P. Tous les échantillons de la figure 8.12 ont été préparés avec des proportions constantes de PSOC 1532 et de pyrrhotite tandis que la concentration en dunite augmente progressivement de 5 à 30 % en masse. L'influence de la dunite est extrêmement faible au sein des mélanges. Si l'on compare aux mélanges binaires équivalents, c'est à dire sans dunite, on remarque une réflectance constamment plus importante (mais de peu) pour le mélange avec enrobage tandis que les mélange intimes avec ou sans dunite sont à peu de choses près équivalents (voir figure 9.12).

Deux familles principales de spectres sont identifiables dans la figure 8.12, elles correspondent aux mélanges intimes et avec enrobage des agrégats. Dans ces deux familles, l'augmentation de 5% en masse à 30% en masse en dunite ne change pas la réflectance ni la pente spectrale de manière significative. Bien qu'une légère fluctuation soit observable pour les mélanges avec agrégats/enrobage, il n'y en a pas avec les mélanges intimes et, dans tous les cas, aucune tendance ne ressort de cette augmentation de la proportion de dunite. Nous ne reviendrons pas sur les causes des différences spectrales observées entre mélanges avec agrégats et mélanges intimes (augmentation de la réflectance principalement dans l'infrarouge et léger rougissement de la pente spectrale), qui sont similaires aux mélanges binaires.

9.5 Mélanges mixtes

Les mélanges binaires et ternaires composés de grains micrométriques et sub-micrométriques ne parviennent pas à reproduire avec satisfaction le spectre de référence VIRTIS. Il est donc intéressant d'explorer les résultats obtenus pour les mélanges mixtes présentés précédemment dans les figures 8.14, 8.15 et 8.17. Ces échantillons sont dit « mixtes » car ils contiennent des particules très fines (micro et sub-micrométriques) et des grains plus gros, de l'ordre de plusieurs dizaines à quelques centaines de micromètres. Ces gros grains pouvant être qualifiés en réalité de résidus de broyage car ce sont effectivement des morceaux qui étaient présents dans le broyeur planétaire mais qui ont échappé au broyage. Leur présence dans ces échantillons est due à l'absence de tamisage à la sortie du broyage.

9.5.1 Phases pures

Pour le PSOC 1532, deux cas se présentent : certains échantillons contiennent des grains non broyés dont la taille maximale est inférieure à 200 µm car filtrés avant le broyage (échantillon A figure 8.15a) ;

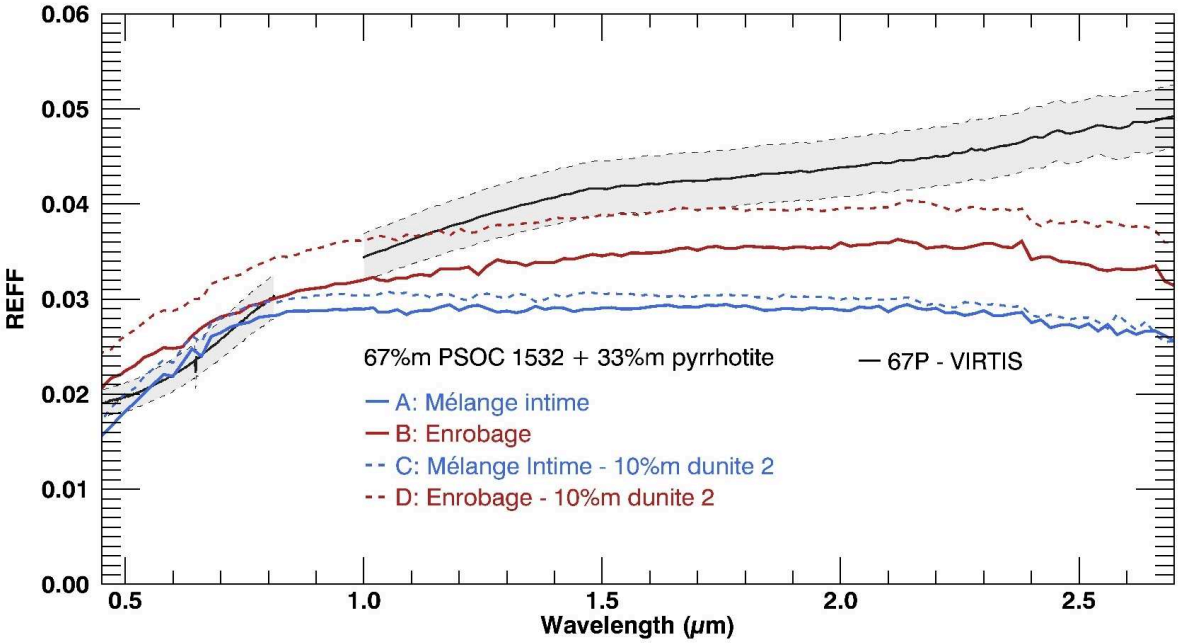


FIGURE 9.12 – Comparaison des spectres de PSOC 1532 et de pyrrhotite avec ou sans dunite (10% en masse) des figures 8.12 et 8.13a. Les A et C (mélange intime) doivent être comparé l'un à l'autre ; même chose pour les spectres B et D.

d'autres échantillons contiennent ces mêmes grains mais sans avoir été pré-tamisé et n'ont donc pas de contraintes supérieures sur leurs tailles (échantillon B figure 8.15a). La différence est marquée dans le cas du PSOC 1532 (figure 8.15a) et l'échantillon pré-tamisé a des réflectances plus importantes que l'échantillon non pré-tamisé. Cette différence marquée entre les deux échantillons peut s'expliquer par le fait que plus les grains sont gros plus ils sont absorbants, augmentant l'efficacité de la diffusion en volume. Lorsqu'ils sont inférieurs à 200 µm, ils absorbent moins que ceux des tailles supérieures. De plus, lorsque l'échantillon est pré-tamisé, le broyage est plus efficace et plus de grains de l'ordre du micron sont présents, augmentant l'enrobage des gros grains et réduisant la diffusion en volume de manière générale, ce qui conduit à des réflectances plus élevées.

Dans le cas de la pyrrhotite il n'y a pas d'échantillon non pré-tamisé, le seul contenant de gros grains non broyés a été pré-tamisé à des tailles inférieures à 200 µm et est semblable spectralement à des échantillons sans ces grains comme le montre la figure 8.5 des échantillons purs de pyrrhotite. Ici, l'absence de différences entre un échantillon uniquement composé de particules micro et sub-micrométriques et un deuxième en contenant avec de gros grains très brillants (car favorisant les réflexions spéculaires) s'explique par l'enrobage de ces derniers par les plus petits. Les réflexions spéculaires des gros grains sont réduites car la première couche de petites particules a absorbé les photons.

9.5.2 Mélanges binaires mixtes

Le PSOC 1532 et la pyrrhotite pré-tamisés ont été mélangés dans différentes proportions et sont représentés dans les figures 8.14. Comme dans le cas des mélanges binaires micrométriques, la réflectance de chaque mélange n'est pas la combinaison linéaire des deux composés. Dès les faibles proportions de

pyrrhotite, qui vont de 2% en masse à 50% en masse, celle-ci fait diminuer drastiquement la réflectance du mélange et diminue le contraste des bandes d'absorption du PSOC 1532 visibles à 1.9 µm et 2.3 µm. Dès 13% en masse de pyrrhotite, le spectre est plus proche de celui de la pyrrhotite que du PSOC 1532 qui reste pourtant le composé majoritaire. On voit ici le même phénomène que dans le cas des mélanges binaires précédents à savoir que c'est le composé le plus sombre qui domine.

Ces mesures permettent d'obtenir un résultat très satisfaisant avec une proportion de 33% en masse de pyrrhotite puisque le spectre est presque similaire à celui de 67P, que ce soit d'un point de vue de la réflectance ou de la pente spectrale, dans le visible comme dans l'infrarouge. La figure 9.13 nous permet de comparer ce mélange (A) avec ceux réalisés avec les mêmes proportions de PSOC 1532 et de pyrrhotite mais composés uniquement de particules micro et sub-micrométriques (B et C). Dans l'ensemble, tous ces échantillons s'accordent bien avec les mesures de VIRTIS dans le visible, même si le mélange avec enrobage (C) présente une réflectance légèrement au-dessus. L'accord dans cette gamme spectrale s'interprète par la combinaison entre la faible réflectance de la pyrrhotite et de la pente spectrale du PSOC 1532, indispensable pour s'accorder avec les mesures VIRTIS. Dans l'infrarouge, bien que possédant une pente spectrale rougissante, l'échantillon avec enrobage (C) est encore trop sombre. Le mélange intime (B) est également trop sombre en plus d'être plat.

La présence dans l'échantillon mixte (A figure 9.13) de grains de PSOC 1532 et de pyrrhotite de plusieurs dizaines voire centaines de microns, c'est à dire non broyés, semble ainsi nécessaire pour reproduire le spectre de surface de 67P. Quantifier l'effet des petites particules et des gros grains est impossible d'autant que des agrégats de PSOC 1532 couverts (partiellement pour certains d'entre eux) de pyrrhotite sont sans doute présents. Il est possible d'avoir une contribution de la diffusion en surface venant des gros grains de pyrrhotite (flèches bleues de la photo C figure 8.16 page 190) qui, pour certains, ne seraient pas totalement couverts par la pyrrhotite plus fine. Cette interprétation, qui fait intervenir la pente rouge et la réflectance élevée de la pyrrhotite broyée à la main (échantillons F et G de la figure 8.5 page 176), permet d'expliquer pourquoi ce mélange s'ajuste bien aux données VIRTIS dans l'infrarouge contrairement aux autres échantillons (B et C figure 9.13). Cette potentielle contribution de la diffusion en surface de la pyrrhotite doit cependant être modérée pour ne pas dominer le spectre.

La taille des grosses particules de PSOC 1532 joue également un rôle comme on voit dans la figure 8.15. Dans cet exemple, c'est avec l'échantillon pré-tamisé (A) que le mélange final s'ajuste au spectre VIRTIS ; si on utilise un échantillon non pré-tamisé de PSOC 1532 (B), les gros grains sont trop absorbants et conduisent à un mélange dont la réflectance est trop faible (échantillon D).

On voit donc que chaque composé a un rôle dans un mélange si complexe. La réflectance résultante provient d'un équilibre (non linéaire) de l'influence de chaque phase, aussi bien d'un point de vue de la composition que d'un point de vue de la taille des grains. Les gros grains jouant indéniablement un rôle dans ce mélange mixte, rôle qui permet de coller aux observations VIRTIS. Les implications vis à vis de la surface de la comète seront discutés dans la discussion à la page 215.

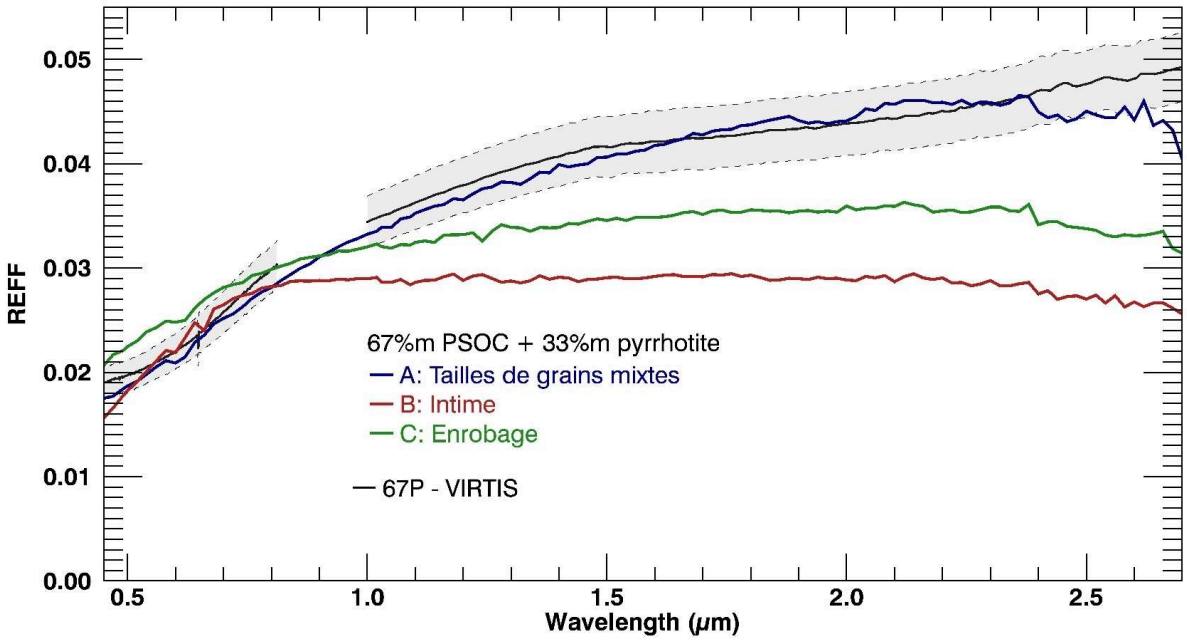


FIGURE 9.13 – Comparaison entre mélanges binaires avec 67% en masse de PSOC 1532 et 33% en masse de pyrrhotite : mixte (A) contenant des grains fins et plus gros (< 200 µm) ; intime (B) et avec agrégat (C) ne contenant que des grains fins.

9.5.3 Mélanges ternaires mixtes

La figure 8.17 page 190 donne l'évolution d'un mélange mixte contenant une quantité croissante de dunite, de 1% en masse à 50% en masse, avec un rapport constant de PSOC 1532 et de pyrrhotite (67 :33% en masse). Dans ces échantillons, le PSOC 1532 et la pyrrhotite ont été pré-tamisés. La dunite elle ne contient pas de gros grains et ne présente pas d'agrégat. Contrairement aux mélanges ternaires équivalents (c'est à dire dont les matériaux ont la même granulométrie), aussi bien intimes qu'avec agrégats (figure 8.13a), on note une évolution avec la teneur croissante en dunite. Celle-ci se fait de façon croissante à mesure que l'on va vers le visible, domaine où la dunite pure est la plus claire. Vers 2.0 µm, l'écart entre les différents mélanges se resserre bien que la dunite soit toujours très brillante dans cette gamme. Le PSOC 1532 l'étant aussi, ce sont sans doute les fines particules de pyrrhotite qui dominent ici. On note un bon accord avec le spectre de 67P pour une proportion de 5% en masse et 10% en masse de dunite. En dessous, même si l'accord n'est pas mauvais, la variabilité est trop importante et la teneur en dunite trop faible pour que le résultat soit fiable.

Un des points intéressants est de constater que l'on observe dans ce mélange complexe une variation de la réflectance et de la pente spectrale importante qui n'est pas présente dans les mélanges ternaires intimes et avec agrégats. La dunite pourrait s'exprimer spectralement parce qu'elle ne forme pas d'agrégats. N'étant pas recouverte, celle-ci est contenue dans le mélange à l'image d'un mélange spatiale ou intime. Dans le cas d'un mélange intime, on s'attendrait à ce que le composé sombre domine. Argument auquel on peut opposer le fait que la pyrrhotite étant en partie sous forme de gros grains non broyés, cela engendre un nombre réduit de petites particules qui sont celles qui domineraient la dunite. Dans le cas d'un mélange spatial, il serait plus logique de voir la dunite s'exprimer. Enfin, il est aussi possible

que la visibilité spectrale de la dunite ne soit pas due uniquement à ces différents facteurs (mélange in-time/spatial, absence d'agrégats de dunite ou PSOC 1532 et pyrrhotite sous forme mixte). Encore une fois, ces possibilités sont des points difficiles voire impossibles à évaluer, d'autant qu'aucune photo binoculaire n'est disponible pour ces échantillons. Il n'est donc pas possible de confirmer ces hypothèses qui par ailleurs ne sont pas incompatibles entre elles.

Conclusion : implications pour la surface de 67P

Alors que nous venons de discuter la composition, la taille de grains et la texture des échantillons présentés précédemment, il est important d'étudier les implications concernant la surface de 67P. Tous ces paramètres permettent d'apporter des contraintes ou de mettre au jour des mécanismes parfois mal caractérisés et qui pourraient jouer un rôle important dans le cas d'une surface cométaire comme celle de 67P. Au-delà de reproduire le spectre de la comète, ce qui nous donne tout de même de bonnes indications sur ses propriétés, il est primordial d'avoir un regard critique sur les résultats obtenus et de les remettre dans le contexte de la mission et des études menées par les autres instruments.

Concernant la composition, nous avons déjà évoqué la limite que constituent nos matériaux analogues. Rappelons par exemple que le PSOC 1532 est un matériau typiquement terrestre et n'est pas attendu sur un corps extraterrestre comme 67P. Cependant, on attend des analogues dont la composition est proche : Fray et al. (2016) montre ainsi que la matière organique de 67P se rapproche de la matière organique insoluble (IOM) des chondrites carbonées et Quirico et al. (2016) montre que le PSOC 1532 a des propriétés similaires à cette IOM. Ce composé nous permet d'apporter la quantité de carbone suffisante pour obtenir, avec le fer de la pyrrhotite, un rapport C/Fe similaire à celui observé pour 67P et pour le Soleil (Lodders, 2010; Fulle et al., 2017). Il permet l'obtention de la pente spectrale rouge dans le visible et dans le début de l'infrarouge lorsque celle-ci n'est pas écrasée par la pyrrhotite, d'où son importance dans nos expériences. Enfin, c'est le représentant d'une famille de composés indispensables puisque la phase réfractaire des corps cométaires est en effet constituée majoritairement par de la matière organique.

Les mesures des compositions et des propriétés des grains de poussières ou de glaces réalisés à la comète, notamment par GIADA, permettent d'estimer les pourcentages des principaux composés présents au sein du noyau. A partir des estimations de volumes, des mesures de la masse du noyau, de la macro-porosité et de la micro-porosité des grains de glaces ou de poussières, Fulle et al. (2017) estime les pourcentages volumiques des matériaux principaux composant une comète : les glaces représenteraient ainsi 20% en volume, les sulfures de fer 4% en volume, les silicates 22% en volume et les organiques 54% en volume. Dans un calcul détaillé en annexe 9.5.3 page 329 on estime les ordres de grandeur des pourcentages massiques équivalents relatifs aux réfractaires (en excluant les glaces qui sont absentes de

nos échantillons donc). Cela représente 9% en masse de sulfures de fer, 32% en masse de silicates et 59% en masse d'organiques. Nous ne discuterons pas du pourcentage de sulfures de fer qui est faible par rapport au nôtre, en effet : d'une part ces chiffres sont des ordres de grandeur, et d'autre part la composition et la teneur en carbone dans les organiques et celle en fer des silicates peut influencer le rapport C/Fe que nous avons souhaité garder proche de la valeur solaire (Lodders, 2010).

Concernant les silicates cependant, on s'attend à en avoir une proportion non négligeable. On constate à travers nos mesures que leur influence peut être différente selon le type de mélange. Elle est marquée jusqu'à ne plus faire correspondre nos échantillons avec le spectre de 67P comme c'est le cas avec 10% en masse dans les mélanges mixtes (où le PSOC 1532 et la pyrrhotite ont deux tailles de grains différentes). Elle est totalement négligeable avec 30% en masse dans des mélanges intimes et avec agrégats (où tous les composés contiennent des particules micro et sub-micrométriques). Qu'en conclure ? Si l'estimation des 30% en masse de silicates est fiable alors notre mélange mixte n'est pas représentatif de ce à quoi on s'attend vis à vis de la taille des grains, composition et texture. Si elle ne l'est pas, alors la proportion de silicates dans nos mélanges et sur la surface de 67P est un paramètre non contraignant. Dans nos échantillons intimes et avec enrobage il ne l'est même absolument pas en raison de l'absence de variabilité qu'il engendre. Cela signifie qu'une contrainte disparaît, mais aussi qu'un des paramètres est impossible à estimer !

La pyrrhotite semble quant à elle un bon analogue cométaire dans nos mélanges et ces expériences ont permis de mettre en avant que sa composition combinée à une petite taille de grain permettent d'obtenir des réflectances très faibles. Si les résultats présentés ici ne fonctionnent qu'avec la pyrrhotite et écartent la pyrite, ils n'excluent pas la possibilité de trouver un mélange de sulfures de fer à la surface de 67P ou d'autres comètes comme c'est le cas dans les météorites, qu'ils soient proches ou non de la pyrrhotite.

Ces expériences ont mis en évidence la formation d'agrégats pour la dunite et le PSOC 1532 tandis que la pyrrhotite n'en formait pas ou peu, et ce, en suivant le même protocole expérimental. Même s'il est possible qu'existe une dépendance vis à vis de ce protocole concernant la formation de ces agrégats, ce sont aussi les forces électrostatiques et de Van der Waals des matériaux qui entrent en jeu comme le montrent Nordheim et al. (2015) et Hilchenbach et al. (2017) qui s'intéressent aux propriétés mécaniques et électrostatiques des poussières de 67P. Ces forces peuvent être déterminantes vis à vis de la structure de l'échantillon, et dans le cas de la comète de la structure des premiers microns de sa surface – c'est à dire l'équivalent de la profondeur sondée par un instrument comme VIRTIS. D'une part, ce sont elles qui faciliteront la mise en place de structures très aérées dites en château de fée – *« fairy castle »* – qui influencent la réflectance de façon conséquente. D'autre part, elles facilitent également la formation et le maintien des agrégats dans nos échantillons tout en permettant à la pyrrhotite de les recouvrir. Or, à nouveau, on a pu observer les changements de réflectance et de pente spectrale entre des mélanges de type intime et avec agrégats enrobés de pyrrhotite. Ce phénomène d'agrégation combiné à l'enrobage par la pyrrhotite peut être en outre décisif sur la surface de 67P. On observe ainsi dans nos échantillons des réflectances faibles, dominées par la pyrrhotite, alors qu'un ou plusieurs composés sont présents en quantités non négligeables (dunite) voire majoritaire (PSOC 1532). Bien qu'un mélange intime est plus efficace pour assombrir un échantillon (les fines particules absorbantes dominent), l'enrobage, en étant parfois imparfait, permet au constituant recouvert de s'exprimer spectralement. Ce qui peut être

nécessaire pour retrouver une pente spectrale rouge dans l'infrarouge par exemple (figure 8.12 page 183 et 8.13 page 185).

L'étude des phases pures a permis de mettre en avant l'influence importante de la taille des grains sur le niveau de réflectance et sur la pente spectrale. Au sein d'un mélange c'est donc un paramètre décisif. On le voit à travers les mélanges binaires et ternaires réalisés avec les mêmes proportions de matériaux, qu'ils soient intimes, avec enrobages ou mixtes. Tandis qu'il n'est pas possible d'obtenir un accord avec le spectre de 67P dans le cas d'un mélange intime ou avec enrobage faits de 67% en masse de PSOC 1532 et de 33% en masse de pyrrhotite, ces mêmes proportions le permettent si les tailles de grain sont mixtes au sein du même mélange (voir figures 8.14 page 187, 8.12 page 183 et 8.13 page 185). Les instruments MIDAS, COSIMA et GIADA nous ont permis d'obtenir un éventail des tailles et des types de particules collectées dans la coma. Ces tailles varient de quelques dizaines de nanomètres à plusieurs millimètres pour des particules aussi bien compactes que ressemblant fort à nos agrégats. On retrouve donc en partie les propriétés de nos échantillons mais il ne faut pas oublier que ces collectes présentent des biais observationnels : distance au noyau, orientation de la sonde...et surtout types d'observations : tous ces instruments observent depuis la coma. La redéposition de poussières à la surface (efficace pour des grains plus lourds que 1 mg (Fulle et al., 2017)), la morphologie et la nature du sol des terrains les plus actifs ou l'existence potentielle d'autre mécanismes impliquant une ségrégation vis à vis de la taille ou de la masse (donc de la densité et par conséquent de la composition) peuvent favoriser l'éjection de certaines tailles de poussières.

Les expériences présentées soutiennent la présence de pyrrhotite à la surface de 67P pour expliquer son albédo bas. Combiner ce sulfure de fer avec une phase organique du même type que le PSOC 1532 – c'est à dire proche de l'IOM (Quirico et al., 2016; Fray et al., 2016) – permet de retrouver les caractéristiques spectrales de la surface tandis que les silicates semblent jouer un rôle mineur selon la taille de leurs grains. Par ailleurs, les expériences montrent que la granulométrie doit atteindre des tailles micrométriques à sub-micrométriques, particulièrement pour la pyrrhotite, afin de reproduire le spectre de 67P. Pour autant, de fines particules seules ne suffisent pas et la présence de grains modérément plus gros (de l'ordre de la centaine de micromètres) doivent être inclus dans les échantillons pour reproduire les observations de VIRTIS.

Conclusion générale et perspectives

Les données du spectro-imageur VIRTIS m'ont permis de mener une étude photométrique de la surface de 67P. J'ai déterminé les paramètres photométriques de l'hémisphère Nord et comparé leur dérivation à l'aide des modèles de Lommel-Seeliger et de Hapke dans une version simplifiée. En complément, les fonctions de phase de Henyey-Greenstein à un et deux lobes ont également été testées. Malgré le nombre important de données, la couverture en angle de phase nous limite dans la détermination de ces paramètres et il est par conséquent préférable d'utiliser un modèle qui reste relativement simple afin de ne pas engendrer d'incertitudes inutiles. Le modèle de Lommel-Seeliger a ainsi été préféré pour dériver l'albédo de diffusion simple et pour le cartographier lui et la pente spectrale, ce qui m'a permis dans un premier temps d'étudier leurs variations en surface. Dans un second temps, j'ai étudié l'albédo de diffusion simple et le paramètre d'asymétrie à l'échelle locale. J'ai alors mis en évidence les propriétés différentes du matériel de surface observés sur deux zones aux morphologies distinctes, en l'occurrence des terrains lisses et d'autres accidentés. Ces différences peuvent être interprétées du point de vue de l'altération spatiale et par conséquent de la durée d'exposition de la surface. À l'inverse des terrains lisses, les terrains accidentés sont exposés depuis plus longtemps et présentent une pente spectrale moins rouge, signe de cette altération. Les terrains lisses quant à eux sont plus susceptibles de subir des changements. Grâce à cette étude, j'ai également mis l'accent sur le fait qu'étudier la surface à l'échelle globale en faisant l'hypothèse que le paramètre d'asymétrie est constant introduit une incertitude qu'il serait intéressant d'évaluer plus en détails.

La sensibilité de VIRTIS dans l'infrarouge permet la dérivation des températures. Dans la perspective de l'exploitation des données de VIRTIS-H à ces fins, et connaissant l'existence d'écarts dans la calibration entre VIRTIS-M et VIRTIS-H, il est nécessaire de caractériser l'erreur existant entre les deux voies instrumentales lors de ces calculs. C'est un travail que j'ai mené et dans lequel j'ai, d'une part, mis en évidence que l'écart spatial entre les champs de vue des deux voies n'introduit pas de biais importants, et d'autre part, que l'écart en température pour la même observation est constant, d'environ 8K en l'occurrence, et donc que les tendances d'évolution de la température sont les mêmes entre VIRTIS-M et VIRTIS-H au cours de cette observation. Le jeu de données de VIRTIS-H possède encore un fort potentiel puisque nombre d'observations peuvent être exploitées à des fins d'études de la température, notamment les rasters qui ont permis de balayer une grande partie de la surface et qui sont les seules observations en infrarouge autour du périhélie. La caractérisation des écarts entre les deux voies instrumentales constitue le travail préliminaire à une telle exploitation.

La collaboration que j'ai développé avec l'IPAG pour y mener des travaux expérimentaux a été une immense chance pour moi. Renforcer l'analyse des données VIRTIS par un travail expérimental consistant à produire des analogues cométaires et avec l'objectif de reproduire les observations a été extrêmement enrichissant et excitant. J'ai eu la possibilité de travailler en autonomie et notamment sur du matériel non testé jusqu'à présent, à l'image du broyeur planétaire, avec ainsi la nécessité de mettre en place de nouveaux protocoles. Le bilan de ces expériences est très positif et ouvre la voie à d'autres investigations. La forme des spectres de VIRTIS a été en partie reproduite et j'ai montré qu'il faut pour cela utiliser une gamme de taille de grains allant de quelques dizaines de nanomètres à quelques centaines de micromètres. Il est également nécessaire d'utiliser un sulfure de fer, ici de la pyrrhotite, afin de reproduire le faible albédo de 67P. Ce matériau possède en effet l'avantage de présenter un spectre neutre et d'être très sombre lorsqu'il est broyé à des très petites tailles. Au-delà de cet objectif, qui permettra de mieux contraindre la composition de la surface de 67P, les effets de différents paramètres ont pu être évalué dans la centaine d'échantillons mesurés : tailles de grains, type de mélanges (intime, spatial), composition.

Les travaux présentés dans ce manuscrit reposent en grande partie sur le fantastique jeu de données que VIRTIS a acquis autour de 67P pendant deux ans et demi. Dans la partie II qui concerne les études photométriques et thermiques, seule une partie de ce jeu de données a été utilisé. Cela signifie que de nombreuses études peuvent encore être faites. En photométrie, ce peut être à l'échelle globale et sur un temps plus long sous la condition d'hypothèses assez fortes (paramètre d'asymétrie et rugosité macroscopique constants à la surface par exemple) ou plus localement dans la première phase de la mission préférentiellement, afin de disposer d'une couverture en phase suffisante. Étant donné que l'on ne tient pas compte de la diversité photométrique liée à la nature des terrains (que j'ai mis en évidence) lors des études réalisées à l'échelle globale et sur une période de temps plus longue (de plusieurs MTP), il serait justement intéressant de quantifier les biais introduits. Enfin, dans un but méthodologique, d'autres méthodes d'ajustements des modèles existent et pourraient être testées.

L'étude du jeu de données VIRTIS passe également par des études combinées ou par la comparaison des résultats obtenus avec d'autres instruments, que ce soit à bord de Rosetta ou avec des jeux de données antérieurs comme celui de la sonde Deep Impact qui a conduit à une analyse détaillée du noyau de la comète 9P/Tempel 1. Concernant Rosetta, des observations avaient été planifiées en fin de mission afin d'être réalisées par plusieurs instruments simultanément. Cela pourra donner lieu à des études comparatives entre les résultats déduits des observations de VIRTIS et de celles de MIRO ou d'OSIRIS par exemple. Coupler le pouvoir spectroscopique de VIRTIS avec la haute résolution spatiale de la caméra OSIRIS est intéressant dans l'étude des tâches brillantes associées à la glace d'eau. Alors que le repérage se fera plutôt par OSIRIS, le diagnostic spectral est en effet appuyé par VIRTIS. Des travaux préliminaires de repérages ont ainsi déjà été entamés en collaboration avec Pedro Hasselmann du LESIA. De même, ces deux instruments peuvent être utilisés pour réaliser des études photométriques conjointes. Il serait donc intéressant de réaliser le même type d'étude que j'ai réalisé sur Imhotep.

Quant au travail expérimental réalisé à l'IPAG durant trois mois cumulés, il ne demande qu'à être poursuivi étant donnés les résultats encourageants obtenus. De nombreux objectifs sont envisageables à court

terme : affiner la composition et tester différents matériaux, mieux évaluer et contraindre la taille des grains, varier les effets de texture des échantillons comme la compacité ou encore réaliser des mesures de réflectance dans de multiples géométries, notamment hors du plan principal afin d'étudier leurs paramètres photométriques. A terme, une collaboration avec l'équipe d'Antoine Pommerol de l'Université de Bern, et d'Olivier Poch, désormais à l'IPAG, permettrait d'intégrer de la glace d'eau à ces échantillons afin de les rendre encore plus fidèle du matériel cométaire. Ce serait ainsi l'occasion d'étudier la sublimation de la glace – pouvant être suivie au cours du temps – qui donne finalement à l'échantillon un aspect extrêmement poreux, le rendant plus proche d'un analogue cométaire.

La surface de 67P est un sujet d'étude très riche et les recherches la concernant ne sont pas terminées. Ainsi, pour étudier plus en profondeur ses propriétés, j'ai la chance d'intégrer depuis peu un groupe de travail international soutenu par l'*International Space Science Institute* (ISSI) de Bern, et formé par Mauro Ciarniello de l'IAPS, à Rome, qui mènera des études sur deux thématiques : d'une part la modélisation du transfert radiatif, et d'autre part des expériences de laboratoire. Dans les deux cas l'enjeu est de déterminer les propriétés de la surface de 67P à travers la modélisation des spectres VIRTIS et l'étude de la photométrie, celle de la composition de la surface, son état (taille des grains, porosité) ou encore celle des constantes optiques des matériaux en jeu. Je suis personnellement en charge d'une partie des études expérimentales visant à étudier la composition de la surface. Le travail mené dans cette thèse sera donc poursuivi et approfondi à travers l'intégration à cette équipe qui compte poursuivre les efforts relatifs à l'étude de la surface de 67P/Churyumov-Gerasimenko. Il sera qui plus facilité puisque je travaillerai à partir de fin 2017 à l'IPAG.

Bibliographie

Adams, J. B. (1974). Visible and near-infrared diffuse reflectance spectra of pyroxenes as applied to remote sensing of solid objects in the Solar System. *Journal of Geophysical Research*, 79(32) :4829–4836.

Adams, J. B. (1975). *Interpretation of visible and near-infrared diffuse reflectance spectra of pyroxenes and other rock-forming minerals*, pages 91–116. Academic Press New York.

Adams, J. B. and Filice, A. L. (1967). Spectral reflectance 0.4 to 2.0 microns of silicate rock powders. *Journal of Geophysical Research*, 72 :5705.

A'Hearn, M. F., Belton, M. J. S., Delamere, W. A., Feaga, L. M., Hampton, D., Kissel, J., Klaasen, K. P., McFadden, L. A., Meech, K. J., Melosh, H. J., Schultz, P. H., Sunshine, J. M., Thomas, P. C., Veverka, J., Wellnitz, D. D., Yeomans, D. K., Besse, S., Bodewits, D., Bowling, T. J., Carcich, B. T., Collins, S. M., Farnham, T. L., Groussin, O., Hermalyn, B., Kelley, M. S., Kelley, M. S., Li, J.-Y., Lindler, D. J., Lisse, C. M., McLaughlin, S. A., Merlin, F., Protopapa, S., Richardson, J. E., and Williams, J. L. (2011). EPOXI at comet Hartley 2. *Science*, 332(6036) :1396.

A'Hearn, M. F., Belton, M. J. S., Delamere, W. A., Kissel, J., Klaasen, K. P., McFadden, L. A., Meech, K. J., Melosh, H. J., Schultz, P. H., Sunshine, J. M., Thomas, P. C., Veverka, J., Yeomans, D. K., Baca, M. W., Busko, I., Crockett, C. J., Collins, S. M., Desnoyer, M., Eberhardy, C. A., Ernst, C. M., Farnham, T. L., Feaga, L., Groussin, O., Hampton, D., Ipatov, S. I., Li, J.-Y., Lindler, D., Lisse, C. M., Mastrodemos, N., Owen, W. M., Richardson, J. E., Wellnitz, D. D., and White, R. L. (2005). Deep impact : Excavating comet Tempel 1. *Science*, 310(5746) :258–264.

A'Hearn, M. F., Feaga, L. M., Keller, H. U., Kawakita, H., Hampton, D. L., Kissel, J., Klaasen, K. P., McFadden, L. A., Meech, K. J., Schultz, P. H., Sunshine, J. M., Thomas, P. C., Veverka, J., Yeomans, D. K., Besse, S., Bodewits, D., Farnham, T. L., Groussin, O., Kelley, M. S., Lisse, C. M., Merlin, F., Protopapa, S., and Wellnitz, D. D. (2012). Cometary volatiles and the origin of comets. *The Astrophysical Journal*, 758 :29.

Aléon, J., Engrand, C., Robert, F., and Chaussidon, M. (2001). Clues to the origin of interplanetary dust particles from the isotopic study of their hydrogen-bearing phases. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(23) :4399–4412.

Altwegg, K. (2008). Rapporteur paper on the composition of comets. *Space Science Reviews*, 138(1) :291–300.

Altwegg, K., Balsiger, H., Bar-Nun, A., Berthelier, J. J., Bieler, A., Bochsler, P., Briois, C., Calmonte, U., Combi, M., De Keyser, J., Eberhardt, P., Fiethe, B., Fuselier, S., Gasc, S., Gombosi, T. I., Hansen, K., Hässig, M., Jäckel, A., Kopp, E., Korth, A., LeRoy, L., Mall, U., Marty, B., Mousis, O., Neefs, E., Owen, T., Rème, H., Rubin, M., Sémon, T., Tzou, C.-Y., Waite, H., and Wurz, P. (2015). 67P/Churyumov-Gerasimenko, a Jupiter family comet with a high D/H ratio. *Science*, 347(6220).

Altwegg, K., Balsiger, H., Bar-Nun, A., Berthelier, J.-J., Bieler, A., Bochsler, P., Briois, C., Calmonte, U., Combi, M. R., Cottin, H., De Keyser, J., Dhooghe, F., Fiethe, B., Fuselier, S. A., Gasc, S., Gombosi, T. I., Hansen, K. C., Haessig, M., Ja ckel, A., Kopp, E., Korth, A., Le Roy, L., Mall, U., Marty, B., Mousis, O., Owen, T., Reme, H., Rubin, M., Semon, T., Tzou, C.-Y., Waite, J. H., and Wurz, P. (2016). Prebiotic chemicals–amino acid and phosphorus–in the coma of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. *Science Advances*, 2 :e1600285–e1600285.

Andrieu, F., Douté, S., Schmidt, F., and Schmitt, B. (2015). Radiative transfer model for contaminated rough slabs. *Applied optics*, 54(31) :9228–9241.

Andrieu, F., Schmidt, F., Schmitt, B., Douté, S., and Brissaud, O. (2015). Radiative transfer model for contaminated slabs : experimental validations. *ArXiv e-prints*.

Aronson, J. R. and Emslie, A. G. (1973). Spectral reflectance and emittance of particulate materials. 2 : Applications and results. *Applied Optics*, 12 :2573.

Auger, A.-T., Groussin, O., Jorda, L., Bouley, S., Gaskell, R., Lamy, P. L., Capanna, C., Thomas, N., Pommerol, A., Sierks, H., Barbieri, C., Rodrigo, R., Koschny, D., Rickman, H., Keller, H. U., Agarwal, J., A'Hearn, M. F., Barucci, M. A., Bertaux, J.-L., Bertini, I., Cremonese, G., Da Deppo, V., Davidsson, B., Debei, S., De Cecco, M., El-Maarry, M. R., Fornassier, S., Fulle, M., Gutiérrez, P. J., Güttler, C., Hviid, S., Ip, W.-H., Knollenberg, J., Kramm, J.-R., Kührt, E., Küppers, M., La Forgia, F., Lara, L. M., Lazzarin, M., Lopez Moreno, J. J., Marchi, S., Marzari, F., Massironi, M., Michalik, H., Naletto, G., Oklay, N., Pajola, M., Sabau, L., Tubiana, C., Vincent, J.-B., and Wenzel, K.-P. (2015). Geomorphology of the imhotep region on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko from OSIRIS observations. *A&A*.

Bar-Nun, A., Herman, G., Laufer, D., and Rappaport, M. L. (1985). Trapping and release of gases by water ice and implications for icy bodies. *Icarus*, 63 :317–332.

Barucci, M. A. (2008). *The Solar System beyond Neptune*. University of Arizona Press.

Barucci, M. A., Filacchione, G., Fornasier, S., Raponi, A., Deshapriya, J. D. P., Tosi, F., Feller, C., Ciarniello, M., Sierks, H., Capaccioni, F., Pommerol, A., Massironi, M., Oklay, N., Merlin, F., Vincent, J.-B., Fulchignoni, M., Guilbert-Lepoutre, A., Perna, D., Capria, M. T., Hasselmann, P. H., Rousseau, B., Barbieri, C., Bockelée-Morvan, D., Lamy, P. L., De Sanctis, C., Rodrigo, R., Érard, S., Koschny, D., Leyrat, C., Rickman, H., Drossart, P., Keller, H. U., A'Hearn, M. F., Arnold, G., Bertaux, J.-L., Bertini, I., Cerroni, P., Cremonese, G., Da Deppo, V., Davidsson, B. J. R., El-Maarry, M. R., Fonti, S., Fulle, M., Groussin, O., Güttler, C., Hviid, S. F., Ip, W., Jorda, L., Kappel, D., Knollenberg, J., Kramm,

J.-R., Kührt, E., Küppers, M., Lara, L., Lazzarin, M., Lopez Moreno, J. J., Mancarella, F., Marzari, F., Mottola, S., Naletto, G., Pajola, M., Palomba, E., Quirico, E., Schmitt, B., Thomas, N., and Tubiana, C. (2016). Detection of exposed H2O ice on the nucleus of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. *A&A*, 595.

Beck, P., Pommerol, A., Thomas, N., Schmitt, B., Moynier, F., and Barrat, J.-A. (2012). Photometry of meteorites. *Icarus*, 218 :364–377.

Belzile, N., Chen, Y.-W., Cai, M.-F., and Li, Y. (2004). A review on pyrrhotite oxidation. *Journal of Geochemical Exploration*, 84(2) :65–76.

Bentley, M. S., Schmied, R., Mannel, T., Torkar, K., Jeszenszky, H., Romstedt, J., Levasseur-Regourd, A.-C., Weber, I., Jessberger, E. K., Ehrenfreund, P., Koeberl, C., and Havnes, O. (2016). Aggregate dust particles at comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. *Nature*, 537(7618) :73–75.

Beth, A., Altwegg, K., Balsiger, H., Berthelier, J.-J., Calmonte, U., Combi, M. R., De Keyser, J., Dhooghe, F., Fiethe, B., Fuselier, S. A., Galand, M., Gasc, S., Gombosi, T. I., Hansen, K. C., Hässig, M., Héritier, K. L., Kopp, E., Le Roy, L., Mandt, K. E., Peroy, S., Rubin, M., Sémon, T., Tzou, C.-Y., and Vigren, E. (2016). First in situ detection of the cometary ammonium ion NH_4^+ (protonated ammonia NH3) in the coma of 67P/CG near perihelion. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 462(Suppl. 1) :S562–S572.

Bibring, J.-P., Langevin, Y., Carter, J., Eng, P., Gondet, B., Jorda, L., Le Mouélic, S., Mottola, S., Pilorget, C., Poulet, F., and Vincendon, M. (2015). 67P/Churyumov-Gerasimenko surface properties as derived from CIVA panoramic images. *Science*, 349(6247).

Bieler, A., Altwegg, K., Balsiger, H., Bar-Nun, A., Berthelier, J.-J., Bochsler, P., Briois, C., Calmonte, U., Combi, M., De Keyser, J., van Dishoeck, E. F., Fiethe, B., Fuselier, S. A., Gasc, S., Gombosi, T. I., Hansen, K. C., Hassig, M., Jackel, A., Kopp, E., Korth, A., Le Roy, L., Mall, U., Maggiolo, R., Marty, B., Mousis, O., Owen, T., Reme, H., Rubin, M., Semon, T., Tzou, C.-Y., Waite, J. H., Walsh, C., and Wurz, P. (2015). Abundant molecular oxygen in the coma of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. *Nature*, 526(7575) :678–681.

Birch, S. P. D., Tang, Y., Hayes, A. G., Kirk, R. L., Bodewits, D., Campins, H., Fernandez, Y., de Freitas Bart, R., Kutsop, N. W., Sierks, H., Soderblom, J. M., Squyres, S. W., and Vincent, J.-B. (2017). Geomorphology of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 469(Suppl. 2) :S50–S67.

Biver, N. and Bockelée-Morvan, D. (2016). Chemical diversity in the comet population. *IAU Focus Meeting*, 29(27) :228–232.

Biver, N., Bockelée-Morvan, D., Moreno, R., Crovisier, J., Colom, P., Lis, D. C., Sandqvist, A., Boissier, J., Despois, D., and Milam, S. N. (2015). Ethyl alcohol and sugar in comet C/2014 Q2 (Lovejoy). *Science Advances*, 1 :e1500863–e1500863.

Bockelée-Morvan, D., Gautier, D., ant, F. H., Huré, J.-M., and Robert, F. (2002). Turbulent radial mixing in the solar nebula as the source of crystalline silicates in comets. *A&A*, 384(3) :1107–1118.

Bockelée-Morvan, D., Rinaldi, G., Erard, S., Leyrat, C., Capaccioni, F., Drossart, P., Filacchione, G., Migliorini, A., Quirico, E., Mottola, S., Tozzi, G., Arnold, G., Biver, N., Combes, M., Crovisier, J., Longobardo, A., Blecka, M., and Capria, M.-T. (2017). Comet 67p outbursts and quiescent coma at 1.3 au from the sun : dust properties from rosetta/virtis-h observations. *Montly Notices of the Royal Astronomical Society*, 469 :S443–S458.

Boctor, N. Z., Meyer, H. O. A., and Kullerud, G. (1976). Lafayette meteorite : petrology and opaque mineralogy. *Earth and Planetary Science Letters*, 32(1) :69–76.

Bonnefoy, N. (2001). *Développement d'un spectrophoto-goniométre pour l'étude de la réflectance bidirectionnelle de surfaces géophysiques : application au soufre et perspectives pour le satellite Io*. PhD thesis, Université Joseph Fourier Grenoble 1.

Bonnet, J.-Y., Quirico, E., Buch, A., Thissen, R., Szopa, C., Carrasco, N., Cernogora, G., Fray, N., Cottin, H., Roy, L. L., Montagnac, G., Dartois, E., Brunetto, R., Engrand, C., and Duprat, J. (2015). Formation of analogs of cometary nitrogen-rich refractory organics from thermal degradation of tholin and hcn polymer. *Icarus*, 250 :53–63.

Bradley, J., Dai, Z. R., Erni, R., Browning, N., Graham, G., Weber, P., Smith, J., Hutcheon, I., Ishii, H., Bajt, S., Floss, C., Stadermann, F., and Sandford, S. (2005). An astronomical 2175 å feature in interplanetary dust particles. *Science*, 307(5707) :244.

Bradley, J. P., Keller, L. P., Snow, T. P., Hanner, M. S., Flynn, G. J., Gezo, J. C., Clemett, S. J., Brownlee, D. E., and Bowey, J. E. (1999). An infrared spectral match between gems and interstellar grains. *Science*, 285(5434) :1716.

Brasser, R. and Morbidelli, A. (2013). Oort cloud and scattered disc formation during a late dynamical instability in the Solar System. *Icarus*, 225 :40–49.

Brissaud, O., Schmitt, B., Bonnefoy, N., Douté, S., Rabou, P., Grundy, W., and Fily, M. (2004). Spectrogonio radiometer for the study of the bidirectional reflectance and polarization functions of planetary surfaces. 1. Design and tests. *Appl. Opt.*, 43(9) :1926–1937.

Britt, D., Bell, J., Haack, H., and Scott, E. (1992). The Reflectance Spectrum of Troilite. In *Lunar and Planetary Science Conference*, volume 23 of *Lunar and Planetary Science Conference*, pages 167–168.

Britt, D. T., Boice, D. C., Buratti, B. J., Campins, H., Nelson, R. M., Oberst, J., Sandel, B. R., Stern, S. A., Soderblom, L. A., and Thomas, N. (2004). The morphology and surface processes of comet 19/p borrelly. *Special Issue on DS1/Comet Borrelly*, 167(1) :45–53.

Britt, D. T. and Pieters, C. M. (1988). Bidirectional reflectance properties of iron-nickel meteorites. In Ryder, G., editor, *Lunar and Planetary Science Conference Proceedings*, volume 18 of *Lunar and Planetary Science Conference Proceedings*, pages 503–512.

Brouet, Y., Levasseur-Regourd, A. C., Sabouroux, P., Neves, L., Encrenaz, P., Poch, O., Pommerol, A., Thomas, N., Kofman, W., Le Gall, A., Ciarletti, V., Hérique, A., Lethuillier, A., Carrasco, N., and

Szopa, C. (2016). A porosity gradient in 67P/c-g nucleus suggested from CONSERT and SESAME-PP results : an interpretation based on new laboratory permittivity measurements of porous icy analogues. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 462(Suppl 1) :S89–S98.

Brown, A. J. (2014). Spectral bluing induced by small particles under the Mie and rayleigh regimes. 239 :85–95.

Brownlee, D. (2014). The Stardust mission : Analyzing samples from the edge of the Solar System. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 42(1) :179–205.

Brownlee, D., Tsou, P., Aléon, J., Alexander, C. M. O., Araki, T., Bajt, S., Baratta, G. A., Bastien, R., Bland, P., Bleuet, P., Borg, J., Bradley, J. P., Brearley, A., Brenker, F., Brennan, S., Bridges, J. C., Browning, N. D., Brucato, J. R., Bullock, E., Burchell, M. J., Busemann, H., Butterworth, A., Chaussidon, M., Cheuvront, A., Chi, M., Cintala, M. J., Clark, B. C., Clemett, S. J., Cody, G., Colangeli, L., Cooper, G., Cordier, P., Daghlian, C., Dai, Z., D'Hendecourt, L., Djouadi, Z., Dominguez, G., Duxbury, T., Dworkin, J. P., Ebel, D. S., Economou, T. E., Fakra, S., Fairey, S. A. J., Fallon, S., Ferrini, G., Ferroir, T., Fleckenstein, H., Floss, C., Flynn, G., Franchi, I. A., Fries, M., Gainsforth, Z., Gallien, J.-P., Genge, M., Gilles, M. K., Gillet, P., Gilmour, J., Glavin, D. P., Gounelle, M., Grady, M. M., Graham, G. A., Grant, P. G., Green, S. F., Grossemy, F., Grossman, L., Grossman, J. N., Guan, Y., Hagiya, K., Harvey, R., Heck, P., Herzog, G. F., Hoppe, P., Hörz, F., Huth, J., Hutcheon, I. D., Ignatyev, K., Ishii, H., Ito, M., Jacob, D., Jacobsen, C., Jacobsen, S., Jones, S., Joswiak, D., Jurewicz, A., Kearsley, A. T., Keller, L. P., Khodja, H., Kilcoyne, A. D., Kissel, J., Krot, A., Langenhorst, F., Lanzirotti, A., Le, L., Leshin, L. A., Leitner, J., Lemelle, L., Leroux, H., Liu, M.-C., Luening, K., Lyon, I., MacPherson, G., Marcus, M. A., Marhas, K., Marty, B., Matrajt, G., McKeegan, K., Meibom, A., Mennella, V., Messenger, K., Messenger, S., Mikouchi, T., Mostefaoui, S., Nakamura, T., Nakano, T., Newville, M., Nittler, L. R., Ohnishi, I., Ohsumi, K., Okudaira, K., Papanastassiou, D. A., Palma, R., Palumbo, M. E., Pepin, R. O., Perkins, D., Perronnet, M., Pianetta, P., Rao, W., Rietmeijer, F. J. M., Robert, F., Rost, D., Rotundi, A., Ryan, R., Sandford, S. A., Schwandt, C. S., See, T. H., Schlutter, D., Sheffield-Parker, J., Simionovici, A., Simon, S., Sitnitsky, I., Snead, C. J., Spencer, M. K., Stadermann, F. J., Steele, A., Stephan, T., Stroud, R., Susini, J., Sutton, S. R., Suzuki, Y., Taheri, M., Taylor, S., Teslich, N., Tomeoka, K., Tomioka, N., Toppani, A., Trigo-Rodríguez, J. M., Troadec, D., Tsuchiyama, A., Tuzzolino, A. J., Tyliszczak, T., Uesugi, K., Velbel, M., Vellenga, J., Vicenzi, E., Vincze, L., Warren, J., Weber, I., Weisberg, M., Westphal, A. J., Wirick, S., Wooden, D., Wopenka, B., Wozniakiewicz, P., Wright, I., Yabuta, H., Yano, H., Young, E. D., Zare, R. N., Zega, T., Ziegler, K., Zimmerman, L., Zinner, E., and Zolensky, M. (2006). Comet 81P/Wild 2 under a microscope. *Science*, 314(5806) :1711–1716.

Brownlee, D. E. (1978). Interplanetary dust - possible implications for comets and presolar interstellar grains. In Gehrels, T., editor, *IAU Colloq. 52 : Protostars and Planets*, pages 134–150.

Brownlee, D. E. (1985). Cosmic dust - collection and research. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 13 :147–173.

Brownlee, D. E., Horz, F., Newburn, R. L., Zolensky, M., Duxbury, T. C., Sandford, S., Sekanina, Z., Tsou, P., Hanner, M. S., Clark, B. C., Green, S. F., and Kissel, J. (2004). Surface of young Jupiter family comet 81P/Wild 2 : View from the Stardust spacecraft. *Science*, 304(5678) :1764.

Bullock, E., Gounelle, M., Lauretta, D., Grady, M., and Russell, S. (2005). Mineralogy and texture of Fe-Ni sulfides in CI1 chondrites : Clues to the extent of aqueous alteration on the CI1 parent body. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(10) :2687–2700.

Bullock, E. S., McKeegan, K. D., Gounelle, M., Grady, M. M., and Russell, S. S. (2010). Sulfur isotopic composition of Fe-Ni sulfide grains in CI and CM carbonaceous chondrites. *Meteoritics and Planetary Science*, 45(5) :885–898.

Burns, R. (1970). Crystal field spectra and evidence of cation ordering in olivine minerals. *American Mineralogist*, 55(9-10) :1608.

Burns, R. G. (1989). Spectral mineralogy of terrestrial planets - scanning their surfaces remotely. *Mineralogical Magazine*, 53(370) :135–151.

Burns, R. G. (2005). *Mineralogical Applications of Crystal Field Theory*.

Busemann, H., Nguyen, A. N., Cody, G. D., Hoppe, P., Kilcoyne, A. D., Stroud, R. M., Zega, T. J., and Nittler, L. R. (2009). Ultra-primitive interplanetary dust particles from the comet 26P/Grigg-Skjellerup dust stream collection. *Earth and Planetary Science Letters*, 288(1-2) :44–57.

Capaccioni, F., Coradini, A., Filacchione, G., Érard, S., Arnold, G., Drossart, P., De Sanctis, M. C., Bockelée-Morvan, D., Capria, M. T., Tosi, F., Leyrat, C., Schmitt, B., Quirico, E., Cerroni, P., Mennella, V., Raponi, A., Ciarniello, M., McCord, T., Moroz, L., Palomba, E., Ammannito, E., Barucci, M. A., Bellucci, G., Benkhoff, J., Bibring, J. P., Blanco, A., Blecka, M., Carlson, R., Carsenty, U., Colangeli, L., Combes, M., Combi, M., Crovisier, J., Encrenaz, T., Federico, C., Fink, U., Fonti, S., Ip, W. H., Irwin, P., Jaumann, R., Kuehrt, E., Langevin, Y., Magni, G., Mottola, S., Orofino, V., Palumbo, P., Piccioni, G., Schade, U., Taylor, F., Tiphene, D., Tozzi, G. P., Beck, P., Biver, N., Bonal, L., Combe, J.-P., Despan, D., Flamini, E., Fornasier, S., Frigeri, A., Grassi, D., Gudipati, M., Longobardo, A., Markus, K., Merlin, F., Orosei, R., Rinaldi, G., Stephan, K., Cartacci, M., Cicchetti, A., Giuppi, S., Hello, Y., Henry, F., Jacquinod, S., Noschese, R., Peter, G., Politi, R., Reess, J. M., and Semery, A. (2015). The organic-rich surface of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko as seen by VIRTIS/Rosetta. *Science*, 347(6220).

Carrasco, N., Schmitz-Afonso, I., Bonnet, J.-Y., Quirico, E., Thissen, R., Dutuit, O., Bagag, A., Laprévote, O., Buch, A., Giulani, A., Adandé, G., Ouni, F., Hadamcik, E., Szopa, C., and Cernogora, G. (2009). Chemical characterization of titan's tholins : Solubility, morphology and molecular structure revisited. *Journal of Physical Chemistry A*, 113 :11195–11203.

Chandrasekhar, S. (1960). *Radiative transfer*.

Christophe Michel-Lévy, M. (1968). Un chondre exceptionnel dans la météorite de Vigarano. *Bulletin de la Société Français de Minéeralogie et de Cristallographie*, 91 :212–214.

Ciarniello, M., Capaccioni, F., and Filacchione, G. (2014). A test of Hapke model by means of Monte Carlo ray-tracing. *Icarus*, 237(0) :293–305.

Ciarniello, M., Capaccioni, F., Filacchione, G., Raponi, A., Tosi, F., De Sanctis, M. C., Capria, M. T., Érard, S., Bockelée-Morvan, D., Leyrat, C., Arnold, G., Barucci, A., Beck, P., Bellucci, G., Fornasier, S., Longobardo, A., Mottola, S., Palomba, E., Quirico, E., and Schmitt, B. (2015). Photometric properties of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko from VIRTIS-M onboard Rosetta. *A&A*.

Ciarniello, M., Raponi, A., Capaccioni, F., Filacchione, G., Tosi, F., DeSanctis, M. C., Kappel, D., Rousseau, B., Arnold, G., Capria, M. T., Barucci, M. A., Quirico, E., Longobardo, A., Kuehrt, E., Mottola, S., Érard, S., Bockelée-Morvan, D., Leyrat, C., Migliorini, A., Zinzi, A., Palomba, E., Schmitt, B., Piccioni, G., Cerroni, P., Ip, W.-H., Rinaldi, G., and Salatti, M. (2016). The global surface composition of 67P/Churyumov-Gerasimenko nucleus by Rosetta/VIRTIS. ii) diurnal and seasonal variability. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*.

Clark, R. (1999). *Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy*. John Wiley and Sons, Inc, a. rencz, editor edition.

Clark, R. N. and Roush, T. L. (1984). Reflectance spectroscopy : Quantitative analysis techniques for remote sensing applications. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 89(B7) :6329–6340.

Claustres, L. (2000). Modelisation de la fonction de distribution de la reflectance bidirectionnelle, un etat de l art.

Clénet, H., Pinet, P., Daydou, Y., Heuripeau, F., Rosemberg, C., Baratoux, D., and Chevrel, S. (2011). A new systematic approach using the modified gaussian model : Insight for the characterization of chemical composition of olivines, pyroxenes and olivine–pyroxene mixtures. *Icarus*, 213(1) :404–422.

Cloutis, E. A. (2003). Quantitative characterization of coal properties using bidirectional diffuse reflectance spectroscopy. *Fuel*, 82(18) :2239–2254.

Cloutis, E. A., Hardersen, P. S., Bish, D. L., Bailey, D. T., Gaffey, M. J., and Craig, M. A. (2010). Reflectance spectra of iron meteorites : Implications for spectral identification of their parent bodies. *Meteoritics & Planetary Science*, 45(2) :304–332.

Cloutis, E. A., Sanchez, J. A., Reddy, V., Gaffey, M. J., Binzel, R. P., Burbine, T. H., Hardersen, P. S., Hiroi, T., Lucey, P. G., Sunshine, J. M., and Tait, K. T. (2015). Olivine-metal mixtures : Spectral reflectance properties and application to asteroid reflectance spectra. *Icarus*, 252 :39–82.

Colangeli, L., Lopez-Moreno, J. J., Palumbo, P., Rodriguez, J., Cosi, M., Della Corte, V., Esposito, F., Fulle, M., Herranz, M., Jeronimo, J. M., Lopez-Jimenez, A., Epifani, E. M., Morales, R., Moreno, F., Palomba, E., and Rotundi, A. (2007). The grain impact analyser and dust accumulator (GIADA) experiment for the Rosetta mission : Design, performances and first results. *Space Science Reviews*, 128 :803–821.

Combes, M., Crovisier, J., Encrenaz, T., Moroz, V. I., and Bibring, J.-P. (1988). The 2.5-12 micron spectrum of comet Halley from the IKS-VEGA experiment. *Icarus*, 76 :404–436.

Combes, M., Moroz, V. I., Crifo, J. F., Coron, N., and Bibring, J. P. (1985). The 2.5 to 5 microns spectrum of comet Halley from the IKS instrument of VEGA. *Advances in Space Research*, 5 :127–131.

Combes, M., Moroz, V. I., Crifo, J. F., Lamarre, J. M., Charra, J., Sanko, N. F., Soufflot, A., Bibring, J. P., Cazes, S., Coron, N., Crovisier, J., Emerich, C., Encrenaz, T., Gispert, R., Grigoryev, A. V., Guyot, G., Krasnopolsky, V. A., Nikolsky, Y. V., and Rocard, F. (1986). Infrared sounding of comet Halley from VEGA 1. *Nature*, 321 :266–268.

Connelly, J. N., Bizzarro, M., Krot, A. N., Nordlund, Å., Wielandt, D., and Ivanova, M. A. (2012). The absolute chronology and thermal processing of solids in the solar protoplanetary disk. *Science*, 338 :651.

Cooper, C. D. and Mustard, J. F. (1999). Effects of very fine particle size on reflectance spectra of smectite and palagonitic soil. *Icarus*, 142 :557–570.

Coradini, A., Capaccioni, F., Drossart, P., Arnold, G., Ammannito, E., Angrilli, F., Barucci, A., Bellucci, G., Benkhoff, J., Bianchini, G., Bibring, J. P., Blecka, M., Bockelée-Morvan, D., Capria, M. T., Carlson, R., Carsenty, U., Cerroni, P., Colangeli, L., Combes, M., Combi, M., Crovisier, J., De Sanctis, M. C., Encrenaz, E. T., Érard, S., Federico, C., Filacchione, G., Fink, U., Fonti, S., Formisano, V., Ip, W. H., Jaumann, R., Kuehrt, E., Langevin, Y., Magni, G., Mccord, T., Mennella, V., Mottola, S., Neukum, G., Palumbo, P., Piccioni, G., Rauer, H., Saggin, B., Schmitt, B., Tiphene, D., and Tozzi, G. (2007). VIRTIS : An imaging spectrometer for the Rosetta mission. *Space Science Reviews*, 128(1) :529–559.

Cord, A., Pinet, P. C., Chevrel, S. D., Daydou, Y., Shkuratov, Y. G., Stankevich, D. G., and Petrov, D. V. (2004). Physical meaning of the Hapke parameter for macroscopic roughness : Experimental determination for planetary regolith surface analogs and numerical approach. In Mackwell, S. and Stansbery, E., editors, *Lunar and Planetary Science Conference*, volume 35 of *Lunar and Planetary Inst. Technical Report*.

Cord, A. M., Pinet, P. C., Daydou, Y., and Chevrel, S. D. (2003). Planetary regolith surface analogs :. optimized determination of Hapke parameters using multi-angular spectro-imaging laboratory data. *Icarus*, 165 :414–427.

Crovisier, J. and Bockelée-Morvan, D. (1999). Remote observations of the composition of cometary volatiles. *Space Science Reviews*, 90(1) :19–32.

Crovisier, J., Leech, K., Bockelée-Morvan, D., Brooke, T. Y., Hanner, M. S., Altieri, B., Keller, H. U., and Lellouch, E. (1997). The spectrum of comet Hale-Bopp (c/1995 o1) observed with the Infrared Space Observatory at 2.9 astronomical units from the Sun. *Science*, 275(5308) :1904.

Dai, Z. R. and Bradley, J. P. (2001). Iron-nickel sulfides in anhydrous interplanetary dust particles. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(20) :3601–3612.

Davidsson, B. J. R., Sierks, H., Güttler, C., Marzari, F., Pajola, M., Rickman, H., A'Hearn, M. F., Auger, A.-T., El-Maarry, M. R., Fornasier, S., Gutiérrez, P. J., Keller, H. U., Massironi, M., Snodgrass, C., Vincent, J.-B., Barbieri, C., Lamy, P. L., Rodrigo, R., Koschny, D., Barucci, M. A., Bertaux, J.-L., Bertini, I., Cremonese, G., Da Deppo, V., Debei, S., De Cecco, M., Feller, C., Fulle, M., Groussin, O., Hviid, S. F., Höfner, S., Ip, W.-H., Jorda, L., Knollenberg, J., Kovacs, G., Kramm, J.-R., Kührt, E., Küppers, M., La Forgia, F., Lara, L. M., Lazzarin, M., Lopez Moreno, J. J., Moissl-Fraund, R.,

Mottola, S., Naletto, G., Oklay, N., Thomas, N., and Tubiana, C. (2016). The primordial nucleus of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. *A&A*, 592.

De Bergh, C., Schmitt, B., Moroz, L. V., Quirico, E., and Cruikshank, D. P. (2008). *Laboratory Data on Ices, Refractory Carbonaceous Materials, and Minerals Relevant to Transneptunian Objects and Centaurs*, pages 483–506.

De Sanctis, M.-C., Capaccioni, F., Ciarniello, M., Filacchione, G., Formisano, M., Mottola, S., Raponi, A., Tosi, F., Bockelée-Morvan, D., Érard, S., Leyrat, C., Schmitt, B., Ammannito, E., Arnold, G., Barucci, M. A., Combi, M., Capria, M. T., Cerroni, P., Ip, W.-H., Kuehrt, E., McCord, T. B., Palomba, E., Beck, P., Quirico, E., and Team, T. V. I. R. T. I. S. (2015). The diurnal cycle of water ice on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. *Nature*, 525(7570) :500–503.

Debout, V. (2015). *Spectroscopie infrarouge moléculaire avec VIRTIS/Rosetta*. Thèse, LESIA - Observatoire de Paris/.

Della Corte, V., Rotundi, A., Fulle, M., Ivanovski, S., Green, S. F., Rietmeijer, F. J. M., Colangeli, L., Palumbo, P., Sordini, R., Ferrari, M., Accolla, M., Zakharov, V., Mazzotta Epifani, E., Weissman, P., Gruen, E., Lopez-Moreno, J. J., Rodriguez, J., Bussoletti, E., Crifo, J. F., Esposito, F., Lamy, P. L., McDonnell, J. A. M., Mennella, V., Molina, A., Morales, R., Moreno, F., Palomba, E., Perrin, J. M., Rodrigo, R., Zarnecki, J. C., Cosi, M., Giovane, F., Gustafson, B., Ortiz, J. L., Jeronimo, J. M., Leese, M. R., Herranz, M., Liuzzi, V., and Lopez-Jimenez, A. C. (2016). 67P/C-G inner coma dust properties from 2.2 AU inbound to 2.0 AU outbound to the Sun. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 462(Suppl 1) :S210–S219.

Delsemme, A. H. and Wenger, A. (1970). Physico-chemical phenomena in comets–I. 18(5) :709–715.

Deshapriya, J. D. P., Barucci, M. A., Fornasier, S., Feller, C., Hasselmann, P. H., Sierks, H., El-Maarry, M., Pajola, M., Barbieri, C., Lamy, P. L., Rodrigo, R., Koschny, D., Rickman, H., Agarwal, J., A'Hearn, M. F., Bertaux, J.-L., Bertini, I., Boudreault, S., Cremonese, G., Da Deppo, V., Davidsson, B. J. R., Debei, S., Deller, J., De Cecco, M., Fulle, M., Gicquel, A., Groussin, O., Gutierrez, P. J., Güttler, C., Hofmann, M., Hviid, S. F., Ip, W., Jorda, L., Keller, H. U., Knollenberg, J., Kramm, R., Kührt, E., Küppers, M., Lara, L., Lazzarin, M., Lopez Moreno, J., Marzari, F., Mottola, S., Naletto, G., Oklay, N., Perna, D., Pommerol, A., Thomas, N., Tubiana, C., and Vincent, J.-B. (2016). Spectrophotometry of the khonsu region on the comet 67P/Churyumov-Gerasimenko using OSIRIS instrument images. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 462(Suppl 1) :S274–S286.

Dobrica, E., Engrand, C., Duprat, J., Gounelle, M., Leroux, H., Quirico, E., and Rouzaud, J.-N. (2009). Connection between micrometeorites and Wild 2 particles : From Antarctic snow to cometary ices. *Meteoritics and Planetary Science*, 44 :1643–1661.

Dobrica, E., Engrand, C., Leroux, H., Rouzaud, J.-N., and Duprat, J. (2012). Transmission electron microscopy of concordia ultracarbonaceous Antarctic micrometeorites (UCAMMs) : Mineralogical properties. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 76 :68–82.

Dobrovolsky, O. V. and Kajmakov, E. (1977). 4. Surface phenomena in simulated cometary nuclei. *International Astronomical Union Colloquium*, 39 :37–46.

Domingue, D. and Hapke, B. (1992). Disk-resolved photometric analysis of Europan terrains. *Icarus*, 99 :70–81.

Douté, Sylvain and Schmitt, Bernard (1998). A multilayer bidirectional reflectance model for the analysis of planetary surface hyperspectral images at visible and near-infrared wavelengths. *Journal of Geophysical Research*, 103(E13) :31367–31389.

Duprat, J., Engrand, C., Maurette, M., Kurat, G., Gounelle, M., and Hammer, C. (2007). Micrometeorites from central Antarctic snow : The concordia collection. *Advances in Space Research*, 39(4) :605–611.

Egan, W. G. and Hilgeman, T. (1977). The rings of Saturn : A frost-coated semiconductor ? *Icarus*, 30(2) :413–421.

El-Maarry, M. R., Thomas, N., Gracia-Berná, A., Marschall, R., Auger, A.-T., Groussin, O., Mottola, S., Pajola, M., Massironi, M., Marchi, S., Höfner, S., Preusker, F., Scholten, F., Jorda, L., Kührt, E., Keller, H. U., Sierks, H., A'Hearn, M. F., Barbieri, C., Barucci, M. A., Bertaux, J.-L., Bertini, I., Cremonese, G., Da Deppo, V., Davidsson, B., Debei, S., De Cecco, M., Deller, J., Güttler, C., Fornasier, S., Fulle, M., Gutierrez, P. J., Hofmann, M., Hviid, S. F., Ip, W.-H., Knollenberg, J., Koschny, D., Kovacs, G., Kramm, J.-R., Küppers, M., Lamy, P. L., Lara, L. M., Lazzarin, M., Lopez Moreno, J. J., Marzari, F., Michalik, H., Naletto, G., Oklay, N., Pommerol, A., Rickman, H., Rodrigo, R., Tubiana, C., and Vincent, J.-B. (2015). Fractures on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko observed by Rosetta/OSIRIS. *Geophys. Res. Lett.*, 42(13) :5170–5178.

El-Maarry, M. R., Thomas, N., Gracia-Berná, A., Pajola, M., Lee, J.-C., Massironi, M., Davidsson, B., Marchi, S., Keller, H. U., Hviid, S. F., Besse, S., Sierks, H., Barbieri, C., Lamy, P. L., Koschny, D., Rickman, H., Rodrigo, R., A'Hearn, M. F., Auger, A.-T., Barucci, M. A., Bertaux, J.-L., Bertini, I., Bodewits, D., Cremonese, G., Da Deppo, V., De Cecco, M., Debei, S., Güttler, C., Fornasier, S., Fulle, M., Giacomini, L., Groussin, O., Gutierrez, P. J., Ip, W.-H., Jorda, L., Knollenberg, J., Kovacs, G., Kramm, J.-R., Kührt, E., Küppers, M., Lara, L. M., Lazzarin, M., Lopez Moreno, J. J., Marschall, R., Marzari, F., Naletto, G., Oklay, N., Pommerol, A., Preusker, F., Scholten, F., Tubiana, C., and Vincent, J.-B. (2017). Regional surface morphology of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko from Rosetta/OSIRIS images : The southern hemisphere (corrigendum). *A&A*, 598.

El-Maarry, M. R., Thomas, N., Gracia-Berná, A., Pajola, M., Lee, J.-C., Massironi, M., Davidsson, B., Marchi, S., Keller, H. U., Hviid, S. F., Besse, S., Sierks, H., Barbieri, C., Lamy, P. L., Koschny, D., Rickman, H., Rodrigo, R., A'Hearn, M. F., Auger, A.-T., Barucci, M. A., Bertaux, J.-L., Bertini, I., Bodewits, D., Cremonese, G., Da Deppo, V., De Cecco, M., Debei, S., Güttler, C., Fornasier, S., Fulle, M., Giacomini, L., Groussin, O., Gutierrez, P. J., Ip, W.-H., Jorda, L., Knollenberg, J., Kovacs, G., Kramm, J.-R., Kührt, E., Küppers, M., Lara, L. M., Lazzarin, M., Lopez Moreno, J. J., Marschall, R., Marzari, F., Naletto, G., Oklay, N., Pommerol, A., Preusker, F., Scholten, F., Tubiana, C., and Vincent, J.-B. (2016). Regional surface morphology of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko from Rosetta/OSIRIS images : The southern hemisphere. *A&A*, 593.

El-Maarry, M. R., Thomas, N., Giacomini, L., Massironi, M., Pajola, M., Marschall, R., Gracia-Berná, A., Sierks, H., Barbieri, C., Lamy, P. L., Rodrigo, R., Rickman, H., Koschny, D., Keller, H. U., Agarwal, J., A'Hearn, M. F., Auger, A.-T., Barucci, M. A., Bertaux, J.-L., Bertini, I., Besse, S., Bodewits,

D., Cremonese,, G., Da Deppo, V., Davidsson, B., De Cecco, M., Debei, S., Güttler, C., Fornasier, S., Fulle, M., Groussin, O., Gutierrez, P. J., Hviid, S. F., Ip, W.-H., Jorda, L., Knollenberg, J., Kovacs, G., Kramm, J.-R., Kührt, E., Küppers, M., La Forgia, F., Lara, L. M., Lazzarin, M., Lopez Moreno, J. J., Marchi, S., Marzari, F., Michalik, H., Naletto, G., Oklay, N., Pommerol, A., Preusker, F., Scholten, F., Tubiana, C., and Vincent, J.-B. (2015). Regional surface morphology of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko from Rosetta/OSIRIS images. *A&A*, 583 :A26.

Engrand, C., Duprat, J., Dartois, E., Benzerara, K., Leroux, H., Baklouti, D., Bardyn, A., Briois, C., Cottin, H., Fischer, H., Fray, N., Godard, M., Hilchenbach, M., Langevin, Y., Paquette, J., Rynö, J., Schulz, R., Silén, J., Stenzel, O., and Thirkell, L. (2016). Variations in cometary dust composition from Giotto to Rosetta, clues to their formation mechanisms. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 462(Supplement 1) :323–330.

Engrand, C., Duprat, J., Maurette, M., and Gounelle, M. (2007). Fe-Ni Sulfides in Concordia Antarctic Micrometeorites. In *Lunar and Planetary Science Conference*, volume 38 of *Lunar and Planetary Science Conference*, page 1668.

Engrand, C. and Maurette, M. (1998). Carbonaceous micrometeorites from antarctica. *Meteoritics & Planetary Science*, 33(4) :565–580.

Érard, S. and Calvin, W. (1997). New composite spectra of Mars, 0.4-5.7 μm. *Icarus*, 130 :449–460.

Érard, S., Cecconi, B., Le Sidaner, P., Rossi, A. P., Capria, T., Schmitt, B., Génot, V., André, N., Vandaele, A. C., Scherf, M., Hueso, R., Määttänen, A., Thuillot, W., Carry, B., Achilleos, N., Marmo, C., Santolik, O., Benson, K., Fernique, P., Beigbeder, L., Millour, E., Rousseau, B., Andrieu, F., Chauvin, C., Minin, M., Ivanoski, S., Longobardo, A., Bollard, P., Albert, D., Gangloff, M., Jourdane, N., Bouchemit, M., Glorian, J.-M., Trompet, L., Al-Ubaidi, T., Juaristi, J., DesMars, J., Guio, P., Delaa, O., Lagain, A., Soucek, J., and Pisa, D. (2017). Vespa : A community-driven virtual observatory in planetary science. *Planetary and Space Science*.

Evans, H. T. (1970). Lunar troilite : Crystallography. *Science*, 167(3918) :621.

Fernando, J. (2014). *Caractérisation des propriétés physiques de la surface de Mars à partir de mesures spectro-photométriques orbitales*. PhD thesis, Université Paris-Sud - Geops.

Filacchione, G., Ammannito, E., Coradini, A., Capaccioni, F., Piccioni, G., de Sanctis, M., Dami, M., and Barbis, A. (2006). On-ground characterization of Rosetta/VIRTIS-M. II. Spatial and radiometric calibrations. *Review of Scientific Instruments*, 77(10) :103106.

Filacchione, G., Capaccioni, F., Ciarniello, M., Raponi, A., Tosi, F., De Sanctis, M.-C., Érard, S., Bockelée-Morvan, D., Leyrat, C., Arnold, G., Schmitt, B., Quirico, E., Piccioni, G., Migliorini, A., Capria, M., Palomba, E., Cerroni, P., Longobardo, A., Barucci, A., Fornasier, S., Carlson, R., Jaumann, R., Stephan, K., Moroz, L. V., Kappel, D., Rousseau, B., Fonti, S., Mancarella, F., Despan, D., and Faure, M. (2016a). The global surface composition of 67P/CG nucleus by Rosetta/VIRTIS. (i) Prelanding mission phase. *Icarus*, 274 :334–349.

Filacchione, G., Capaccioni, F., Clark, R. N., Cuzzi, J. N., Cruikshank, D. P., Coradini, A., Cerroni, P., Nicholson, P. D., McCord, T. B., Brown, R. H., Buratti, B. J., Tosi, F., Nelson, R. M., Jaumann, R., and Stephan, K. (2010). Saturn's icy satellites investigated by Cassini-VIMS. *Icarus*, 206(2) :507–523.

Filacchione, G., De Sanctis, M. C., Capaccioni, F., Raponi, A., Tosi, F., Ciarniello, M., Cerroni, P., Piccioni, G., Capria, M. T., Palomba, E., Bellucci, G., Érard, S., Bockelée-Morvan, D., Leyrat, C., Arnold, G., Barucci, M. A., Fulchignoni, M., Schmitt, B., Quirico, E., Jaumann, R., Stephan, K., Longobardo, A., Mennella, V., Migliorini, A., Ammannito, E., Benkhoff, J., Bibring, J. P., Blanco, A., Blecka, M. I., Carlson, R., Carsenty, U., Colangeli, L., Combes, M., Combi, M., Crovisier, J., Drossart, P., Encrenaz, T., Federico, C., Fink, U., Fonti, S., Ip, W. H., Irwin, P., Kuehrt, E., Langevin, Y., Magni, G., McCord, T., Moroz, L., Mottola, S., Orofino, V., Schade, U., Taylor, F., Tiphene, D., Tozzi, G. P., Beck, P., Biver, N., Bonal, L., Combe, J.-P., Despan, D., Flamini, E., Formisano, M., Fornasier, S., Frigeri, A., Grassi, D., Gudipati, M. S., Kappel, D., Mancarella, F., Markus, K., Merlin, F., Orosei, R., Rinaldi, G., Cartacci, M., Cicchetti, A., Giuppi, S., Hello, Y., Henry, F., Jacquinod, S., Reess, J. M., Noschese, R., Politi, R., and Peter, G. (2016b). Exposed water ice on the nucleus of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. *Nature*, advance online publication.

Filacchione, G., Raponi, A., Capaccioni, F., Ciarniello, M., Tosi, F., Capria, M. T., De Sanctis, M. C., Migliorini, A., Piccioni, G., Cerroni, P., Barucci, M. A., Fornasier, S., Schmitt, B., Quirico, E., Érard, S., Bockelée-Morvan, D., Leyrat, C., Arnold, G., Mennella, V., Ammannito, E., Bellucci, G., Benkhoff, J., Bibring, J. P., Blanco, A., Blecka, M. I., Carlson, R., Carsenty, U., Colangeli, L., Combes, M., Combi, M., Crovisier, J., Drossart, P., Encrenaz, T., Federico, C., Fink, U., Fonti, S., Fulchignoni, M., Ip, W.-H., Irwin, P., Jaumann, R., Kuehrt, E., Langevin, Y., Magni, G., McCord, T., Moroz, L., Mottola, S., Palomba, E., Schade, U., Stephan, K., Taylor, F., Tiphene, D., Tozzi, G. P., Beck, P., Biver, N., Bonal, L., Combe, J.-P., Despan, D., Flamini, E., Formisano, M., Frigeri, A., Grassi, D., Gudipati, M. S., Kappel, D., Longobardo, A., Mancarella, F., Markus, K., Merlin, F., Orosei, R., Rinaldi, G., Cartacci, M., Cicchetti, A., Hello, Y., Henry, F., Jacquinod, S., Reess, J. M., Noschese, R., Politi, R., and Peter, G. (2016c). Seasonal exposure of carbon dioxide ice on the nucleus of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. *Science*, 354(6319) :1563.

Flynn, G. J., Bleuet, P., Borg, J., Bradley, J. P., Brenker, F. E., Brennan, S., Bridges, J., Brownlee, D. E., Bullock, E. S., Burghammer, M., Clark, B. C., Dai, Z. R., Daghlian, C. P., Djouadi, Z., Fakra, S., Ferroir, T., Floss, C., Franchi, I. A., Gainsforth, Z., Gallien, J.-P., Gillet, P., Grant, P. G., Graham, G. A., Green, S. F., Grossemy, F., Heck, P. R., Herzog, G. F., Hoppe, P., Hörz, F., Huth, J., Ignatyev, K., Ishii, H. A., Janssens, K., Joswiak, D., Kearsley, A. T., Khodja, H., Lanzirotti, A., Leitner, J., Lemelle, L., Leroux, H., Luening, K., MacPherson, G. J., Marhas, K. K., Marcus, M. A., Matrajt, G., Nakamura, T., Nakamura-Messenger, K., Nakano, T., Newville, M., Papanastassiou, D. A., Pianetta, P., Rao, W., Riekel, C., Rietmeijer, F. J. M., Rost, D., Schwandt, C. S., See, T. H., Sheffield-Parker, J., Simionovici, A., Sitnitsky, I., Snead, C. J., Stadermann, F. J., Stephan, T., Stroud, R. M., Susini, J., Suzuki, Y., Sutton, S. R., Taylor, S., Teslich, N., Troadec, D., Tsou, P., Tsuchiyama, A., Uesugi, K., Vekemans, B., Vicenzi, E. P., Vincze, L., Westphal, A. J., Wozniakiewicz, P., Zinner, E., and Zolensky, M. E. (2006). Elemental compositions of comet 81P/Wild 2 samples collected by Stardust. *Science*, 314(5806) :1731–1735.

Fomenkova, M. N., Chang, S., and Mukhin, L. M. (1994). Carbonaceous components in the comet Halley dust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(20) :4503–4512.

Fornasier, S., Hasselmann, P. H., Barucci, M. A., Feller, C., Besse, S., Leyrat, C., Lara, L., Gutierrez, P. J., Oklay, N., Tubiana, C., Scholten, F., Sierks, H., Barbieri, C., Lamy, P. L., Rodrigo, R., Koschny, D., Rickman, H., Keller, H. U., Agarwal, J., A'Hearn, M. F., Bertaux, J.-L., Bertini, I., Cremonese, G., Da Deppo, V., Davidsson, B., Debei, S., De Cecco, M., Fulle, M., Groussin, O., Güttler, C., Hviid, S. F., Ip, W., Jorda, L., Knollenberg, J., Kovacs, G., Kramm, R., Kührt, E., Küppers, M., La Forgia, F., Lazzarin, M., Lopez Moreno, J. J., Marzari, F., Matz, K.-D., Michalik, H., Moreno, F., Mottola, S., Naletto, G., Pajola, M., Pommerol, A., Preusker, F., Shi, X., Snodgrass, C., Thomas, N., and Vincent, J.-B. (2015). Spectrophotometric properties of the nucleus of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko from the OSIRIS instrument onboard the Rosetta spacecraft. *A&A*, 583.

Fornasier, S., Lantz, C., Barucci, M. A., and Lazzarin, M. (2014). Aqueous alteration on main belt primitive asteroids : Results from visible spectroscopy. *Icarus*, 233 :163–178.

Fornasier, S., Mottola, S., Keller, H., Barucci, M., Davidsson, B., Feller, C., Deshapriya, J., Sierks, H., Barbieri, C., Lamy, P., Rodrigo, R., Koschny, D., Rickman, H., A'Hearn, M., Agarwal, J., Bertaux, J.-L., Bertini, I., Besse, S., Cremonese, G., Da Deppo, V., Debei, S., De Cecco, M., Deller, J., El-Maarry, M., Fulle, M., Groussin, O., Gutierrez, P., Güttler, C., Hofmann, M., Hviid, S., Ip, W.-H., Jorda, L., Knollenberg, J., Kovacs, G., Kramm, R., Kührt, E., Küppers, M., Lara, M., Lazzarin, M., Moreno, J., Marzari, F., Massironi, M., Naletto, G., Oklay, N., Pajola, M., Pommerol, A., Preusker, F., Scholten, F., Shi, X., Thomas, N., Toth, I., Tubiana, C., and Vincent, J.-B. (2016). Rosetta s comet 67P/Churyumov-Gerasimenko sheds its dusty mantle to reveal its icy nature. *Science*, 354 :1566–1570.

Fray, N., Bardyn, A., Cottin, H., Altwegg, K., Baklouti, D., Briois, C., Colangeli, L., Engrand, C., Fischer, H., Glasmachers, A., Grün, E., Haerendel, G., Henkel, H., Höfner, H., Hornung, K., Jessberger, E. K., Koch, A., Krüger, H., Langevin, Y., Lehto, H., Lehto, K., Le Roy, L., Merouane, S., Modica, P., Orthous-Daunay, F.-R., Paquette, J., Raulin, F., Rynö, J., Schulz, R., Silén, J., Siljeström, S., Steiger, W., Stenzel, O., Stephan, T., Thirkell, L., Thomas, R., Torkar, K., Varmuza, K., Wanczek, K.-P., Zaprudin, B., Kissel, J., and Hilchenbach, M. (2016). High-molecular-weight organic matter in the particles of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. *Nature*, advance online publication.

Fulle, M. (2004). Motion of cometary dust. *Comets II*, pages 565–575.

Fulle, M., Della Corte, V., Rotundi, A., Green, S. F., Accolla, M., Colangeli, L., Ferrari, M., Ivanovski, S., Sordini, R., and Zakharov, V. (2017). The dust-to-ices ratio in comets and kuiper belt objects. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 469 :S45–S49.

Fulle, M., Della Corte, V., Rotundi, A., Rietmeijer, F. J. M., Green, S. F., Weissman, P., Accolla, M., Colangeli, L., Ferrari, M., Ivanovski, S., Lopez-Moreno, J. J., Epifani, E. M., Morales, R., Ortiz, J. L., Palomba, E., Palumbo, P., Rodriguez, J., Sordini, R., and Zakharov, V. (2016a). Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko preserved the pebbles that formed planetesimals. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 462(Suppl 1) :S132–S137.

Fulle, M., Leblanc, F., Harrison, R. A., Davis, C. J., Eyles, C. J., Halain, J. P., Howard, R. A., Bockelée-Morvan, D., Cremonese, G., and Scarmato, T. (2007). Discovery of the atomic iron tail of comet McNaught using the heliospheric imager on STEREO. *The Astrophysical Journal Letters*, 661(1) :L93.

Fulle, M., Marzari, F., Corte, V. D., Fornasier, S., Sierks, H., Rotundi, A., Barbieri, C., Lamy, P. L., Rodrigo, R., Koschny, D., Rickman, H., Keller, H. U., López-Moreno, J. J., Accolla, M., Agarwal, J., A'Hearn, M. F., Altobelli, N., Barucci, M. A., Bertaux, J.-L., Bertini, I., Bodewits, D., Bussoletti, E., Colangeli, L., Cosi, M., Cremonese, G., Crifo, J.-F., Deppo, V. D., Davidsson, B., Debei, S., Cecco, M. D., Esposito, F., Ferrari, M., Giovane, F., Gustafson, B., Green, S. F., Groussin, O., Grün, E., Gutierrez, P., Güttler, C., Herranz, M. L., Hviid, S. F., Ip, W., Ivanovski, S. L., Jerónimo, J. M., Jorda, L., Knollenberg, J., Kramm, R., Kührt, E., Küppers, M., Lara, L., Lazzarin, M., Leese, M. R., López-Jiménez, A. C., Lucarelli, F., Epifani, E. M., McDonnell, J. A. M., Mennella, V., Molina, A., Morales, R., Moreno, F., Mottola, S., Naletto, G., Oklay, N., Ortiz, J. L., Palomba, E., Palumbo, P., Perrin, J.-M., Rietmeijer, F. J. M., Rodríguez, J., Sordini, R., Thomas, N., Tubiana, C., Vincent, J.-B., Weissman, P., Wenzel, K.-P., Zakharov, V., and Zarnecki, J. C. (2016b). Evolution of the dust size distribution of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko from 2.2 AU to perihelion. *The Astrophysical Journal*, 821(1) :19.

Fulle, M., Ivanovski, S. L., Bertini, I., Gutierrez, P., Lara, L., Sierks, H., Zakharov, V., Della Corte, V., Rotundi, A., Barbieri, C., Lamy, P. L., Rodrigo, R., Koschny, D., Rickman, H., Keller, H. U., Agarwal, J., A'Hearn, M. F., Barucci, M. A., Bertaux, J.-L., Bodewits, D., Cremonese, G., Da Deppo, V., Davidsson, B., Debei, S., De Cecco, M., Fornasier, S., Groussin, O., Güttler, C., Hviid, S. F., Ip, W., Jorda, L., Knollenberg, J., Kramm, R., Kührt, E., Küppers, M., Lazzarin, M., Lopez-Moreno, J. J., Marzari, F., Michalik, H., Naletto, G., Oklay, N., Sabau, L., Thomas, N., Tubiana, C., Vincent, J.-B., and Wenzel, K.-P. (2015). Rotating dust particles in the coma of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. *A&A*, 583 :A14.

Gaffey, S., McFadden, L., Nash, D., and Pieters, C. (1993). *Ultraviolet, visible, and near-infrared reflectance spectroscopy : Laboratory spectra of geologic materials*, pages 43–78. Cambridge University Press : Cambridge, UK.

Geiger, T. and Bischoff, A. (1995). Formation of opaque minerals in ck chondrites. *Small Bodies in the Solar System - Origin, Evolution, and Significance for the Formation of Planets*, 43(3) :485–498.

Glassmeier, K.-H., Boehnhardt, H., Koschny, D., Kührt, E., and Richter, I. (2007). The Rosetta mission : Flying towards the origin of the Solar System. *Space Science Reviews*, 128(1) :1–21.

Gomes, R., Levison, H. F., Tsiganis, K., and Morbidelli, A. (2005). Origin of the cataclysmic late heavy bombardment period of the terrestrial planets. *Nature*, 435 :466–469.

Gomes, R. S., Fern Ndez, J. A., Gallardo, T., and Brunini, A. (2008). *The Scattered Disk : Origins, Dynamics, and End States*, pages 259–273.

Greenwood, J. P., Mojzsis, S. J., and Coath, C. D. (2000). Sulfur isotopic compositions of individual sulfides in martian meteorites ALH84001 and Nakhla : implications for crust-regolith exchange on Mars. *Earth and Planetary Science Letters*, 184(1) :23–35.

Groussin, O., Sierks, H., Barbieri, C., Lamy, P., Rodrigo, R., Koschny, D., Rickman, H., Keller, H. U., A'Hearn, M. F., Auger, A.-T., Barucci, M. A., Bertaux, J.-L., Bertini, I., Besse, S., Cremonese, G., Da Deppo, V., Davidsson, B., Debei, S., De Cecco, M., El-Maarry, M. R., Fornasier, S., Fulle, M., Gutiérrez, P. J., Güttler, C., Hviid, S., Ip, W.-H, Jorda, L., Knollenberg, J., Kovacs, G., Kramm, J. R., Kührt, E., Küppers, M., Lara, L. M., Lazzarin, M., Lopez Moreno, J. J., Lowry, S., Marchi, S., Marzari, F., Massironi, M., Mottola, S., Naletto, G., Oklay, N., Pajola, M., Pommerol, A., Thomas, N., Toth, I., Tubiana, C., and Vincent, J.-B. (2015). Temporal morphological changes in the imhotep region of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. *A&A*, 583 :A36.

Grün, E., Bar-Nun, A., Benkhoff, J., Bischoff, A., Dueren, H., Hellmann, H., Hesselbarth, P., Hsiung, P., Keller, H. U., and Klinger, J. (1991). Laboratory simulation of cometary processes - results from first kosi experiments. In Newburn, Jr., R., Neugebauer, M., and Rahe, J., editors, *IAU Colloq. 116 : Comets in the post-Halley era*, volume 167 of *Astrophysics and Space Science Library*, pages 277–297.

Hanner, M. S. (1999). The silicate material in comets. *Space Science Reviews*, 90(1) :99–108.

Hanner, M. S. and Bradley, J. P. (2004). *Composition and mineralogy of cometary dust*, pages 555–564.

Hapke, B. (1981). Bidirectional reflectance spectroscopy : 1. Theory. *Journal of Geophysical Research*, 86(B4) :3039–3054.

Hapke, B. (1984). Bidirectional reflectance spectroscopy : 3. Correction for macroscopic roughness. *Icarus*, 59(1) :41–59.

Hapke, B. (1986). Bidirectional reflectance spectroscopy : 4. The extinction coefficient and the opposition effect. *Icarus*, 67(2) :264–280.

Hapke, B. (2002). Bidirectional reflectance spectroscopy : 5. The coherent backscatter opposition effect and anisotropic scattering. *Icarus*, 157(2) :523–534.

Hapke, B. (2008). Bidirectional reflectance spectroscopy : 6. Effects of porosity. *Icarus*, 195(2) :918–926.

Hapke, B. (2012). Bidirectional reflectance spectroscopy 7 : The single particle phase function hockey stick relation. *Icarus*, 221(2) :1079–1083.

Hapke, B. (2012). *Theory of reflectance and emittance spectroscopy*. Cambridge University Press.

Hapke, B. and van Hoen, H. (1963). Photometric studies of complex surfaces, with applications to the moon. *Journal of Geophysical Research*, 68(15) :4545–4570.

Hapke, B. and Wells, E. (1981). Bidirectional reflectance spectroscopy : 2. Experiments and observations. *Journal of Geophysical Research*, 86(B4) :3055–3060.

Hartman, B. and Domingue, D. (1998). Scattering of light by individual particles and the implications for models of planetary surfaces. *Icarus*, 131 :421–448.

Helfenstein, P. and Shepard, M. K. (1999). Submillimeter-scale topography of the lunar regolith. *Icarus*, 141 :107–131.

Helfenstein, P. and Shepard, M. K. (2011). Testing the Hapke photometric model : Improved inversion and the porosity correction. *Icarus*, 215(1) :83–100.

Helfenstein, P., Ververka, J., and Thomas, P. C. (1988). Uranus satellites - Hapke parameters from Voyager disk-integrated photometry. *Icarus*, 74 :231–239.

Henkel, H., Höfner, H., Kissel, J., and Koch, A. (2003). COSIMA mass spectrometer for the Rosetta mission. In *EGS - AGU - EUG Joint Assembly*, page 10075.

Henyey, L. and Greenstein, J. (1941). Diffuse radiation in the Galaxy. *The Astrophysical Journal*, 93 :70–83.

Hérique, A., Kofman, W., Beck, P., Bonal, L., Buttarazzi, I., Heggy, E., Lasue, J., Levasseur-Regourd, A. C., Quirico, E., and Zine, S. (2016). Cosmochemical implications of CONSERT permittivity characterization of 67P/CG. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 462 :S516–S532.

Hilchenbach, M., Fischer, H., Langevin, Y., Mérouane, S., Paquette, J., Rynö, J., Stenzel, O., Briois, C., Kissel, J., Koch, A., Schulz, R., Silen, J., Altobelli, N., Baklouti, D., Bardyn, A., Cottin, H., Engrand, C., Fray, N., Haerendel, G., Henkel, H., Höfner, H., Hornung, K., Lehto, H., Mellado, E. M., Modica, P., Le Roy, L., Siljeström, S., Steiger, W., Thirkell, L., Thomas, R., Torkar, K., Varmuza, K., and Zaprudin, B. (2017). Mechanical and electrostatic experiments with dust particles collected in the inner coma of comet 67P by COSIMA onboard Rosetta. *Philosophical transactions of the Royal Society A.*, 375(2097).

Hilchenbach, M., Kissel, J., Langevin, Y., Briois, C., von Hoerner, H., Koch, A., Schulz, R., Silén, J., Altwegg, K., Colangeli, L., Cottin, H., Engrand, C., Fischer, H., Glasmachers, A., Grün, E., Haerendel, G., Henkel, H., Höfner, H., Hornung, K., Jessberger, E. K., Lehto, H., Lehto, K., Raulin, F., Roy, L. L., Rynö, J., Steiger, W., Stephan, T., Thirkell, L., Thomas, R., Torkar, K., Varmuza, K., Wanczek, K.-P., Altobelli, N., Baklouti, D., Bardyn, A., Fray, N., Krüger, H., Ligier, N., Lin, Z., Martin, P., Merouane, S., Orthous-Daunay, F. R., Paquette, J., Revillet, C., Siljeström, S., Stenzel, O., and Zaprudin, B. (2016). Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko : Close-up on dust particle fragments. *The Astrophysical Journal Letters*, 816(2) :L32.

Hunt, G. R. (1977). Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. *Geophysics*, 42(3) :501.

Ibadinov, K. I. (1989). Laboratory investigation of the sublimation of comet nucleus models. *Advances in Space Research*, 9 :97–112.

Jehl, A. (2008). *Etude photometrique de la surface de Mars a partir de la camera HRSC a bord de la sonde Mars ExpressPreparation aux observation orbitale multi-angulaire en exploration planetaire.* PhD thesis.

Jehl, A., Pinet, P., Baratoux, D., Daydou, Y., Chevrel, S., Heuripeau, F., Manaud, N., Cord, A., Rosemberg, C., Neukum, G., Gwinner, K., Scholten, F., Hoffman, H., and Roatsch, T. (2008). Gusev photometric variability as seen from orbit by HRSC/mars-express. *Icarus*, 197(2) :403–428.

Jessberger, E. K., Christoforidis, A., and Kissel, J. (1988). Aspects of the major element composition of Halley's dust. *Nature*, 332 :691–695.

Jia, P., Andreotti, B., and Claudin, P. (2017). Giant ripples on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko sculpted by sunset thermal wind. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(10) :2509–2514.

Jorda, L., Gaskell, R., Capanna, C., Hviid, S., Lamy, P., Ďurech, J., Faury, G., Groussin, O., Gutiérrez, P., Jackman, C., Keihm, S. J., Keller, H. U., Knollenberg, J., Kührt, E., Marchi, S., Mottola, S., Palmer, E., Schloerb, F. P., Sierks, H., Vincent, J.-B., A'Hearn, M. F., Barbieri, C., Rodrigo, R., Koschny, D., Rickman, H., Barucci, M. A., Bertaux, J. L., Bertini, I., Cremonese, G., Da Deppo, V., Davidsson, B., Debei, S., De Cecco, M., Fornasier, S., Fulle, M., Güttler, C., Ip, W.-H., Kramm, J. R., Küppers, M., Lara, L. M., Lazzarin, M., Lopez Moreno, J. J., Marzari, F., Naletto, G., Oklay, N., Thomas, N., Tubiana, C., and Wenzel, K.-P. (2016). The global shape, density and rotation of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko from preperihelion Rosetta/OSIRIS observations. *Icarus*, 277 :257–278.

Jutzi, M. and Asphaug, E. (2015). The shape and structure of cometary nuclei as a result of low-velocity accretion. *Science*, 348(6241) :1355–1358.

Jutzi, M. and Benz, W. (2017). Formation of bi-lobed shapes by sub-catastrophic collisions. *A&A*, 597.

Jutzi, M., Benz, W., Toliou, A., Morbidelli, A., and Brasser, R. (2017). How primordial is the structure of comet 67P ? *A&A*, 597.

Kaib, N. A. and Quinn, T. (2009). Reassessing the source of long-period comets. *Science*, 325 :1234.

Kajmakov, E. A. and Sharkov, V. I. (1972). Laboratory simulation of icy cometary nuclei. In Chebotarev, G., Kazimirchak-Polonskaia, E., and Marsden, B., editors, *The Motion, Evolution of Orbits, and Origin of Comets*, volume 45 of *IAU Symposium*, page 308.

Kamei, A. and Nakamura, A. M. (2002). Laboratory study of the bidirectional reflectance of powdered surfaces : On the asymmetry parameter of asteroid photometric data. *Icarus*, 156 :551–561.

Keller, H. U. (1989). Comets : Dirty snowballs or icy dirtballs. In Hunt, J. and Guyenne, T., editors, *Physics and Mechanics of Cometary Materials*, volume 302 of *ESA Special Publication*.

Keller, L. P., Bajt, S., Baratta, G. A., Borg, J., Bradley, J. P., Brownlee, D. E., Busemann, H., Brucato, J. R., Burchell, M., Colangeli, L., d'Hendecourt, L., Djouadi, Z., Ferrini, G., Flynn, G., Franchi, I. A., Fries, M., Grady, M. M., Graham, G. A., Grossemy, F., Kearsley, A., Matrajt, G., Nakamura-Messenger, K., Mennella, V., Nittler, L., Palumbo, M. E., Stadermann, F. J., Tsou, P., Rotundi, A., Sandford, S. A., Snead, C., Steele, A., Wooden, D., and Zolensky, M. (2006). Infrared spectroscopy of comet 81P/Wild 2 samples returned by Stardust. *Science*, 314(5806) :1728–1731.

Keller, L. P. and Messenger, S. (2008). Relict amorphous silicates in Stardust samples. *Meteoritics and Planetary Science Supplement*, 43 :5227.

Kelley, M. S. and Wooden, D. H. (2009). The composition of dust in Jupiter-family comets inferred from infrared spectroscopy. *Jupiter Family Comets*, 57(10) :1133–1145.

Kelley, M. S. P., Woodward, C. E., Gehrz, R. D., Reach, W. T., and Harker, D. E. (2017). Mid-infrared spectra of comet nuclei. *Icarus*, 284 :344–358.

Kemper, F., Vriend, W. J., and Tielens, A. G. G. M. (2004). The absence of crystalline silicates in the diffuse interstellar medium. *The Astrophysical Journal*, 609(2) :826.

Kerridge, J. F. (1970). Meteoritic pyrrhotite. *Meteoritics*, 5(3) :149–152.

Kimura, M., Grossman, J. N., and Weisberg, M. K. (2011). Fe-Ni metal and sulfide minerals in CM chondrites : An indicator for thermal history. *Meteoritics & Planetary Science*, 46(3) :431–442.

King, T. V. V. and Ridley, W. I. (1987). Relation of the spectroscopic reflectance of olivine to mineral chemistry and some remote sensing implications. *Journal of Geophysical Research*, 92 :11457–11469.

Kissel, J., Brownlee, D. E., Buchler, K., Clark, B. C., Fechtig, H., Grun, E., Hornung, K., Igenbergs, E. B., Jessberger, E. K., Krueger, F. R., Kuczera, H., McDonnell, J. A. M., Morfill, G. M., Rahe, J., Schwehm, G. H., Sekanina, Z., Utterback, N. G., volk, H. J., and Zook, H. A. (1986a). Composition of comet Halley dust particles from Giotto observations. *Nature*, 321(6067s) :336–337.

Kissel, J. and Krueger, F. R. (1987a). The organic component in dust from comet Halley as measured by the PUMA mass spectrometer on board VEGA 1. *Nature*, 326(6115) :755–760.

Kissel, J. and Krueger, F. R. (1987b). Organic dust in comet Halley. *Nature*, 328(6126) :117–117.

Kissel, J., Sagdeev, R. Z., Bertaux, J. L., Angarov, V. N., Audouze, J., Blamont, J. E., Buchler, K., Evlanov, E. N., Fechtig, H., Fomenkova, M. N., von Hoerner, H., Inogamov, N. A., Khromov, V. N., Knabe, W., Krueger, F. R., Langevin, Y., Leonas, V. B., Levasseur-Regourd, A. C., Managadze, G. G., Podkolzin, S. N., Shapiro, V. D., Tabaldyev, S. R., and Zubkov, B. V. (1986b). Composition of comet Halley dust particles from VEGA observations. *Nature*, 321(6067s) :280–282.

Kofman, W., Hérique, A., Barbin, Y., Barriot, J.-P., Ciarletti, V., Clifford, S., Edenhofer, P., Elachi, C., Eyraud, C., Goutail, J.-P., Heggy, E., Jorda, L., Lasue, J., Levasseur-Regourd, A.-C., Nielsen, E., Pasquero, P., Preusker, F., Puget, P., Plettemeier, D., Rogez, Y., Sierks, H., Statz, C., Svedhem, H., Williams, I., Zine, S., and Van Zyl, J. (2015). Properties of the 67P/Churyumov-Gerasimenko interior revealed by CONSERT RADAR. *Science*, 349(6247).

Lambert, J. H. (1760). *Photometria sive de mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae*. Klett.

Langevin, Y., Hilchenbach, M., Ligier, N., Merouane, S., Hornung, K., Engrand, C., Schulz, R., Kissel, J., Rynö, J., and Eng, P. (2016). Typology of dust particles collected by the COSIMA mass spectrometer in the inner coma of 67P/Churyumov Gerasimenko. *Icarus*, 271 :76–97.

Langevin, Y., Kissel, J., Bertaux, J.-L., and Chassefiere, E. (1987). First statistical analysis of 5000 mass spectra of cometary grains obtained by PUMA 1 (VEGA 1) and PIA (Giotto) impact ionization mass spectrometers in the compressed modes. *Astronomy and Astrophysics*, 187 :761–766.

Langevin, Y., Kissel, J., Bertaux, J.-L., and Chassefiere, E. (1987). Impact ionization mass spectrometry of cometary grains on board Giotto, VEGA 1 and VEGA 2 spacecrafts : Preliminary statistical analysis

of spectra in compressed modes. In *Lunar and Planetary Science Conference*, volume 18 of *Lunar and Planetary Science Conference*.

Lantz, C. (2015). *Study of aqueous alteration and space weathering processes of primitive asteroids in support for the forthcoming sample return missions*. Thèses, Université Paris Diderot.

Lantz, C., Brunetto, R., Barucci, M. A., Fornasier, S., Baklouti, D., Bourçois, J., and Godard, M. (2017). Ion irradiation of carbonaceous chondrites : A new view of space weathering on primitive asteroids. *Icarus*, 285 :43–57.

Lantz, C., Clark, B. E., Barucci, M. A., and Lauretta, D. S. (2013). Evidence for the effects of space weathering spectral signatures on low albedo asteroids. *A&A*, 554.

Lawler, M. E. and Brownlee, D. E. (1992). CHON as a component of dust from comet Halley. *Nature*, 359 :810–812.

Lawler, M. E., Brownlee, D. E., Temple, S., and Wheelock, M. M. (1989). Iron, magnesium, and silicon in dust from comet Halley. *Icarus*, 80 :225–242.

Le Bras, A. and Érard, S. (2003). Reflectance spectra of regolith analogs in the mid-infrared : effects of grain size. *Planetary and Space Science*, 51(4-5) :281–294.

Le Roy, L., Altwegg, K., Balsiger, H., Berthelier, J.-J., Bieler, A., Briois, C., Calmonte, U., Combi, M. R., De Keyser, J., Dhooghe, F., Fiethe, B., Fuselier, S. A., Gasc, S., Gombosi, T. I., Hässig, M., Jäckel, A., Rubin, M., and Tzou, C.-Y. (2015). Inventory of the volatiles on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko from Rosetta/Rosina. *A&A*, 583.

Leroux, H. (2012). Fine-grained material of 81P/Wild 2 in interaction with the Stardust aerogel. *Meteoritics & Planetary Science*, 47(4) :613–622.

Levison, H. F., Morbidelli, A., Tsiganis, K., Nesvorný, D., and Gomes, R. (2011). Late orbital instabilities in the outer planets induced by interaction with a self-gravitating planetesimal disk. *Astrophysical Journal*, 142 :152.

Levison, H. F., Morbidelli, A., Vokrouhlický, D., and Bottke, W. F. (2008). On a scattered-disk origin for the 2003 EL_61 collisional family - an example of the importance of collisions on the dynamics of small bodies. *The Astrophysical Journal*, 136 :1079–1088.

Leyrat, C., Coradini, A., Érard, S., Capaccioni, F., Capria, M. T., Drossart, P., De Sanctis, M. C., Tosi, F., and Team, V. (2011). Thermal properties of the asteroid (2867) Steins as observed by VIRTIS/Rosetta. *A&A*, 531.

Leyrat, C., Érard, S., Capaccioni, F., Tosi, F., Filacchione, G., Bockelée-Morvan, D., Capria, T., De Sanctis, M. C., Drossart, P., Schmitt, B., and Arnold, G. (2015a). Surface thermal properties of 67/P inferred by VIRTIS/Rosetta. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*, volume 17 of *EGU General Assembly Conference Abstracts*, page 9767.

Leyrat, C., Tosi, F., Capaccioni, F., Érard, S., Bockelée-Morvan, D., Capria, T., Arnold, G., De Sanctis, C., Schmitt, B., and Drossart, P. (2015b). Investigations of 67P-CG surfaces thermal properties at southern latitudes and variations with heliocentric distances with VIRTIS/Rosetta. *European Planetary Science Congress 2015, id.EPSC2015-435*, 10 :EPSC2015–435.

Leyrat, C., Tosi, F., Capaccioni, F., Érard, S., Rousseau, B., Filacchione, G., Capria, M. T., De Sanctis, M. C., Bockelee-Morvan, D., Kührt, E., Schmitt, B., Migliorini, A., Kappel, D., and Team, V. (2016). Mapping of thermal properties of comet 67P/C-G and temporal variations. In *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts*, volume 48 of *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts*, page 219.02.

Li, J.-Y., Besse, S., A'Hearn, M. F., Belton, M. J., Bodewits, D., Farnham, T. L., Klaasen, K. P., Lisse, C. M., Meech, K. J., Sunshine, J. M., and Thomas, P. C. (2013). Photometric properties of the nucleus of comet 103P/Hartley 2. *Icarus*, 222(2) :559–570.

Lisse, C. M., Kraemer, K. E., Nuth III, J. A., Li, A., and Joswiak, D. (2007). Comparison of the composition of the Tempel 1 ejecta to the dust in comet C/Hale-Bopp 1995 O1 and YSO HD 100546. *Deep Impact at Comet Tempel 1*, 191(2, Supplement) :223–240.

Lisse, C. M., VanCleve, J., Adams, A. C., A'Hearn, M. F., Fernández, Y. R., Farnham, T. L., Armus, L., Grillmair, C. J., Ingalls, J., Belton, M. J. S., Groussin, O., McFadden, L. A., Meech, K. J., Schultz, P. H., Clark, B. C., Feaga, L. M., and Sunshine, J. M. (2006). Spitzer spectral observations of the deep impact ejecta. *Science*, 313(5787) :635–640.

Lodders, K. (2010). Solar System abundances of the elements. *Astrophysics and Space Science Proceedings*, 16 :379.

Love, S. G. and Brownlee, D. E. (1991). Heating and thermal transformation of micrometeoroids entering the Earth's atmosphere. 89(1) :26–43.

Love, S. G. and Brownlee, D. E. (1993). A direct measurement of the terrestrial mass accretion rate of cosmic dust. *Science*, 262 :550.

Lumme, K. and Bowell, E. (1981). Radiative transfer in the surfaces of atmosphereless bodies. I - Theory. II - Interpretation of phase curves. *The Astronomical Journal*, 86 :1694–1721.

Lumme, K. and Bowell, E. (1981). Radiative transfer in the surfaces of atmosphereless bodies. ii. interpretation. *The Astronomical Journal*, 86 :1705–1721.

Luu, J., Marsden, B. G., Jewitt, D., Trujillo, C. A., Hergenrother, C. W., Chen, J., and Offutt, W. B. (1997). A new dynamical class of object in the outer Solar System. *Nature*, 387 :573–575.

MacPherson, G. J. (2003). Calcium-aluminum-rich inclusions in chondritic meteorites. *Treatise on Geochemistry*, 1 :711.

Mannel, T., Bentley, M. S., Schmied, R., Jeszenszky, H., Levasseur-Regourd, A. C., Romstedt, J., and Torkar, K. (2016). Fractal cometary dust - a window into the early Solar System. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 462 :S304–S311.

Maquet, L. (2015). The recent dynamical history of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. *A&A*, 579.

Marshall, D., Hartogh, P., Rezac, L., von Allmen, P., Biver, N., Bockelée-Morvan, D., Crovisier, J., Encrenaz, P., Gulkis, S., Hofstadter, M., Ip, W.-H., Jarchow, C., Lee, S., and Lellouch, E. (2017). Spatially resolved evolution of the local H2O production rates of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko from the MIRO instrument on Rosetta. *A&A*.

Marty, B., Altwegg, K., Balsiger, H., Bar-Nun, A., Bekaert, D. V., Berthelier, J.-J., Bieler, A., Briois, C., Calmonte, U., Combi, M., De Keyser, J., Fiethe, B., Fuselier, S. A., Gasc, S., Gombosi, T. I., Hansen, K. C., Hässig, M., Jäckel, A., Kopp, E., Korth, A., Le Roy, L., Mall, U., Mousis, O., Owen, T., Rème, H., Rubin, M., Sémon, T., Tzou, C.-Y., Waite, J. H., and Wurz, P. (2017). Xenon isotopes in 67P/Churyumov-Gerasimenko show that comets contributed to Earth's atmosphere. *Science*, 356 :1069–1072.

Masiero, J. R., Mainzer, A. K., Grav, T., Bauer, J. M., Cutri, R. M., Dailey, J., Eisenhardt, P. R. M., McMillan, R. S., Spahr, T. B., Skrutskie, M. F., Tholen, D., Walker, R. G., Wright, E. L., DeBaun, E., Elsbury, D., T. Gautier, I. V., Gomillion, S., and Wilkins, A. (2011). Main belt asteroids with WISE/NEOWISE. i. preliminary albedos and diameters. *The Astrophysical Journal*, 741(2) :68.

Matrajt, G., Flynn, G., Brownlee, D., Joswiak, D., and Bajt, S. (2013). The origin of the 3.4 μm feature in Wild 2 cometary particles and in ultracarbonaceous interplanetary dust particles. *The Astrophysical Journal*, 765(2) :145–.

McGuire, A. F. and Hapke, B. W. (1995). An experimental study of light scattering by large, irregular particles. *Icarus*, 113(1) :134–155.

McKeegan, K., Aléon, J., Bradley, J., Brownlee, D., Busemann, H., Butterworth, A., Chaussidon, M., Fallon, S., Floss, C., Gilmour, J., Gounelle, M., Graham, G., Guan, Y., Heck, P., Hoppe, P., Hutcheon, I., Huth, J., Ishii, H., Ito, M., Jacobsen, S., Kearsley, A., Leshin, L., Liu, M.-C., Lyon, I., Marhas, K., Marty, B., Matrajt, G., Meibom, A., Messenger, S., Mostefaoui, S., Mukhopadhyay, S., Nakamura-Messenger, K., Nittler, L., Palma, R., Pepin, R., Papanastassiou, D., Robert, F., Schlutter, D., Snead, C., Stadermann, F., Stroud, R., Tsou, P., Westphal, A., Young, E., Ziegler, K., Zimmermann, L., and Zinner, E. (2006). Isotopic compositions of cometary matter returned by Stardust. *Science*, 314 :1724.

Meador, W. E. and Weaver, W. R. (1975). A photometric function for diffuse reflection by particulate materials. *NASA STI/Recon Technical Report N*, 75.

Meech, K. J. (2017). Setting the scene : what did we know before Rosetta ? *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 375(2097).

Merouane, S., Zaprudin, B., Stenzel, O., Langevin, Y., Altobelli, N., Della Corte, V., Fischer, H., Fulle, M., Hornung, K., Silén, J., Ligier, N., Rotundi, A., Ryno, J., Schulz, R., Hilchenbach, M., Kissel, J., and the COSIMA Team (2016). Dust particle flux and size distribution in the coma of 67P/Churyumov-Gerasimenko measured in situ by the COSIMA instrument on board Rosetta. *A&A*, 596.

Mie, G. (1908). Beiträge zur optik trüber medien, speziell kolloidaler metallösungen. *Annalen der Physik*, 330 :377–445.

Minnaert, M. (1941). The reciprocity principle in lunar photometry. *Astrophysical Journal*, 93 :403–410.

Moersch, J. E. and Christensen, P. R. (1995). Thermal emission from particulate surfaces : A comparison of scattering models with measured spectra. *Journal of Geophysical Research*, 100 :7465–7477.

Morbidelli, A. and Rickman, H. (2015). Comets as collisional fragments of a primordial planetesimal disk. *A&A*, 583 :A43.

Moroz, L., Arnold, G., Korochantsev, A., and Wasch, R. (1998). Natural solid bitumens as possible analogs for cometary and asteroid organics :. *Icarus*, 134(2) :253–268.

Morozhenko, A. V., Kolokolova, L. O., Kaimakov, E. A., and Lizunkova, I. S. (1986). Possible nature of cometary atmosphere particles. *Icarus*, 66 :223–229.

Mottola, S., Arnold, G., Grothues, H.-G., Jaumann, R., Michaelis, H., Neukum, G., Bibring, J.-P., Schroder, S. E., Hamm, M., Otto, K. A., Pelivan, I., Proffe, G., Scholten, F., Tirsch, D., Kreslavsky, M., Remetean, E., Souvannavong, F., and Dolives, B. (2015). The structure of the regolith on 67P/Churyumov-Gerasimenko from ROLIS descent imaging. *Science*, 349(6247).

Mousis, O., Ronnet, T., Brugger, B., Ozgurel, O., Pauzat, F., Ellinger, Y., Maggiolo, R., Wurz, P., Vernazza, P., Lunine, J., Luspay-Kuti, A., Mandt, K., Altwegg, K., Bieler, A., Markovits, A., and Rubin, M. (2016). Origin of molecular oxygen in Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. *ArXiv e-prints*.

Mukhin, L. M., Evlanov, E. N., Fomenkova, M. N., Khromov, V. N., Kissel, J., Prilutsky, O. F., Zubkov, B. V., and Sagdeev, R. Z. (1987). Different types of dust particles in Halley's comet. In *Lunar and Planetary Science Conference*, volume 18 of *Lunar and Planetary Science Conference*.

Mumma, M. J., Weaver, H. A., Larson, H. P., Williams, M., and Davis, D. S. (1986). Detection of water vapor in Halley's comet. *Science*, 232 :1523–1528.

Murchie, S. and Érard, S. (1996). Spectral properties and heterogeneity of Phobos from measurements by Phobos 2. *Icarus*, 123(1) :63–86.

Mustard, J. F. and Hays, J. E. (1997). Effects of hyperfine particles on reflectance spectra from 0.3 to 25 μm. *Icarus*, 125 :145–163.

Nakamura-Messenger, K., Keller, L. P., Clemett, S. J., Messenger, S., and Ito, M. (2011). Nanometer-scale anatomy of entire Stardust tracks. *Meteoritics and Planetary Science*, 46 :1033–1051.

Nichiporuk, W. and Chodos, A. A. (1959). The concentration of vanadium, chromium, iron, cobalt, nickel, copper, zinc, and arsenic in the meteoritic iron sulfide nodules. *Journal of Geophysical Research*, 64(12) :2451–2463.

Nordheim, T. A., Jones, G. H., Halekas, J. S., Roussos, E., and Coates, A. J. (2015). Surface charging and electrostatic dust acceleration at the nucleus of comet 67P during periods of low activity. 119 :24–35.

Ody, A. (2012). *Data reduction and interpretation of data from the spaceborne imaging spectrometer OMEGA/MEx : Volcanic evolution of martian surface*. Theses, Université Paris Sud - Paris XI.

Oklay, N., Sunshine, J. M., Pajola, M., Pommerol, A., Vincent, J.-B., Mottola, S., Sierks, H., Fornasier, S., Barucci, M. A., Preusker, F., Scholten, F., Lara, L. M., Barbieri, C., Lamy, P. L., Rodrigo, R., Koschny, D., Rickman, H., A'Hearn, M. F., Bertaux, J.-L., Bertini, I., Bodewits, D., Cremonese, G., Da Deppo, V., Davidsson, B. J. R., Debei, S., De Cecco, M., Deller, J., Fulle, M., Gicquel, A., Groussin, O., Gutiérrez, P. J., Güttler, C., Hall, I., Hofmann, M., Hviid, S. F., Ip, W.-H., Jorda, L., Keller, H. U., Knollenberg, J., Kovacs, G., Kramm, J.-R., Kührt, E., Küppers, M., Lazzarin, M., Lin, Z.-Y., Lopez Moreno, J. J., Marzari, F., Naletto, G., Shi, X., Thomas, N., and Tubiana, C. (2016a). Comparative study of water ice exposures on cometary nuclei using multispectral imaging data. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 462 :S394–S414.

Oklay, N., Vincent, J.-B., Fornasier, S., Pajola, M., Besse, S., Davidsson, B. J. R., Lara, L. M., Mottola, S., Naletto, G., Sierks, H., Barucci, A. M., Scholten, F., Preusker, F., Pommerol, A., Masoumzadeh, N., Lazzarin, M., Barbieri, C., Lamy, P. L., Rodrigo, R., Koschny, D., Rickman, H., A'Hearn, M. F., Bertaux, J.-L., Bertini, I., Bodewits, D., Cremonese, G., Da Deppo, V., Debei, S., De Cecco, M., Fulle, M., Groussin, O., Gutiérrez, P. J., Güttler, C., Hall, I., Hofmann, M., Hviid, S. F., Ip, W.-H., Jorda, L., Keller, H. U., Knollenberg, J., Kovacs, G., Kramm, J.-R., Kührt, E., Küppers, M., Lin, Z.-Y., Lopez Moreno, J. J., Marzari, F., Moreno, F., Shi, X., Thomas, N., Toth, I., and Tubiana, C. (2016b). Variegation of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko in regions showing activity. *A&A*, 586.

Oort, J. H. (1950). The structure of the cloud of comets surrounding the Solar System and a hypothesis concerning its origin. *Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands*, 11 :91–110.

Ordal, M. A., Long, L. L., Bell, R. J., Bell, S. E., Bell, R. R., Alexander, R. W., and Ward, C. A. (1983). Optical properties of the metals Al, CO, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, and W in the infrared and far infrared. *Appl. Opt.*, 22(7) :1099–1119.

Pajola, M., Mottola, S., Hamm, M., Fulle, M., Davidsson, B., Güttler, C., Sierks, H., Naletto, G., Arnold, G., Grothues, H.-G., Jaumann, R., Michaelis, H., Bibring, J. P., Barbieri, C., Lamy, P. L., Rodrigo, R., Koschny, D., Rickman, H., Keller, H. U., Agarwal, J., A'Hearn, M. F., Barucci, M. A., Bertaux, J. L., Bertini, I., Boudreault, S., Cremonese, G., Da Deppo, V., Debei, S., De Cecco, M., Deller, J., El Maarry, M. R., Feller, C., Fornasier, S., Gicquel, A., Groussin, O., Gutierrez, P. J., Hofmann, M., Hviid, S. F., Ip, W. H., Jorda, L., Knollenberg, J., Kramm, J. R., Kührt, E., Küppers, M., La Forgia, F., Lara, L. M., Lin, Z. Y., Lazzarin, M., Lopez Moreno, J. J., Lucchetti, A., Marzari, F., Massironi, M., Michalik, H., Oklay, N., Pommerol, A., Preusker, F., Scholten, F., Thomas, N., Tubiana, C., and Vincent, J. B. (2016). The Agilkia boulders/pebbles size-frequency distributions : OSIRIS and ROLIS joint observations of 67P surface. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 462(Suppl 1) :S242–S252.

Paquette, J. A., Engrand, C., Stenzel, O., Hilchenbach, M., Kissel, J., and the COSIMA Team (2016). Searching for calcium-aluminum-rich inclusions in cometary particles with Rosetta/COSIMA. *Meteoritics & Planetary Science*, 51(7) :1340–1352.

Pätzold, M., Andert, T., Hahn, M., Asmar, S. W., Barriot, J.-P., Bird, M. K., Häusler, B., Peter, K., Tellmann, S., Grün, E., Weissman, P. R., Sierks, H., Jorda, L., Gaskell, R., Preusker, F., and Scholten, F. (2016). A homogeneous nucleus for comet 67P/Churyumov-Gerasimenko from its gravity field. *Nature*, 530 :63–65.

Pilorget, C., Fernando, J., Ehlmann, B. L., Schmidt, F., and Hiroi, T. (2016). Wavelength dependence of scattering properties in the VIS-NIR and links with grain-scale physical and compositional properties. *Icarus*, 267 :296–314.

Poch, O., Pommerol, A., Jost, B., Carrasco, N., Szopa, C., and Thomas, N. (2016a). Sublimation of ice-tholins mixtures : A morphological and spectro-photometric study. *Icarus*, 266 :288–305.

Poch, O., Pommerol, A., Jost, B., Carrasco, N., Szopa, C., and Thomas, N. (2016b). Sublimation of water ice mixed with silicates and tholins : Evolution of surface texture and reflectance spectra, with implications for comets. *Icarus*, 267 :154–173.

Pollack, J., Hollenbach, D., Beckwith, S., Simonelli, D., Roush, T., and Fong, W. (1994). Composition and radiative properties of grains in molecular clouds and accretion disks. *Astrophysical Journal*, 421 :615–639.

Pommerol, A. (2009). *Mineral hydration at the Martian surface : spectroscopic and thermodynamic characterizations and applications to remote sensing*. Thèses, Université Joseph-Fourier - Grenoble I.

Pommerol, A. and Schmitt, B. (2008). Strength of the H2O near-infrared absorption bands in hydrated minerals : Effects of particle size and correlation with albedo. *Journal of Geophysical Research (Planets)*, 113(E12) :E10009.

Pommerol, A., Thomas, N., El-Maarry, M. R., Pajola, M., Groussin, O., Auger, A.-T., Oklay, N., Fornasier, S., Feller, C., Davidsson, B., Gracia, A., Jost, B., Marschall, R., Poch, O., Barucci, M. A., Bertaux, J.-L., La Forgia, F., Keller, H. U., and CO-authors, . (2015). OSIRIS observations of meter-size exposures of H2O ice at the surface of 67P/Churyumov-Gerasimenko and interpretation using laboratory experiments. *A&A*.

Poulet, F., Bibring, J.-P., Mustard, J. F., Gendrin, A., Mangold, N., Langevin, Y., Arvidson, R. E., Gondet, B., Gomez, C., Berthé, M., Bibring, J.-P., Langevin, Y., Érard, S., Forni, O., Gendrin, A., Gondet, B., Manaud, N., Poulet, F., Poulleau, G., Soufflot, A., Combes, M., Drossart, P., Encrenaz, T., Fouchet, T., Melchiorri, R., Bellucci, G., Altieri, F., Formisano, V., Fonti, S., Capaccioni, F., Cerroni, P., Coradini, A., Korablev, O., Kottsov, V., Ignatiev, N., Titov, D., Zasova, L., Mangold, N., Pinet, P., Schmitt, B., Sotin, C., Hauber, E., Hoffmann, H., Jaumann, R., Keller, U., Arvidson, R., Mustard, J., and Forget, F. (2005). Phyllosilicates on Mars and implications for early martian climate. *Nature*, 438(7068) :623–627.

Poulet, F., Cuzzi, J., Cruikshank, D., Roush, T., and Dalle Ore, C. (2002). Comparison between the shkuratov and Hapke scattering theories for solid planetary surfaces : Application to the surface composition of two centaurs. *Icarus*, 160(2) :313–324.

Poulet, F., Lucchetti, A., Bibring, J.-P., Carter, J., Gondet, B., Jorda, L., Langevin, Y., Pilorget, C., Capanna, C., and Cremonese, G. (2016). Origin of the local structures at the philae landing site and possible implications on the formation and evolution of 67P/Churyumov-Gerasimenko. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 462(Suppl 1) :S23–S32.

Preston, G. (1967). The spectrum of Ikkeya-Seki (1965f). *Astrophysical Journal*, 147 :718–742.

Preusker, F., Scholten, F., Matz, K.-D., Roatsch, T., Willner, K., Hviid, S. F., Knollenberg, J., Jorda, L., Gutiérrez, P. J., Kührt, E., Mottola, S., A'Hearn, M. F., Thomas, N., Sierks, H., Barbieri, C., Lamy, P., Rodrigo, R., Koschny, D., Rickman, H., Keller, H. U., Agarwal, J., Barucci, M. A., Bertaux, J.-L., Bertini, I., Cremonese, G., Da Deppo, V., Davidsson, B., Debei, S., De Cecco, M., Fornasier, S., Fulle, M., Groussin, O., Güttler, C., Ip, W.-H., Kramm, J. R., Küppers, M., Lara, L. M., Lazzarin, M., Lopez Moreno, J. J., Marzari, F., Michalik, H., Naletto, G., Oklay, N., Tubiana, C., and Vincent, J.-B. (2015). Shape model, reference system definition, and cartographic mapping standards for comet 67P/Churyumov-Gerasimenko - stereo-photogrammetric analysis of Rosetta/OSIRIS image data. *A&A*, 583 :A33.

Prialnik, D. (1997). Modelling gas and dust release from comet Hale-Bopp. *Earth, Moon, and Planets*, 77(3) :223–230.

Quirico, E., Borg, J., Raynal, P.-I., Montagnac, G., and d'Hendecourt, L. (2005). A micro-Raman survey of 10 IDPs and 6 carbonaceous chondrites. *Planetary and Space Science*, 53(14-15) :1443–1448.

Quirico, E., Moroz, L., Schmitt, B., Arnold, G., Faure, M., Beck, P., Bonal, L., Ciarniello, M., Capaccioni, F., Filacchione, G., Érard, S., Leyrat, C., Bockelée-Morvan, D., Zinzi, A., Palomba, E., Drossart, P., Tosi, F., Capria, M., De Sanctis, M., Raponi, A., Fonti, S., Mancarella, F., Orofino, V., Barucci, A., Blecka, M., Carlson, R., Despan, D., Faure, A., Fornasier, S., Gudipati, M., Longobardo, A., Markus, K., Mennella, V., Merlin, F., Piccioni, G., Rousseau, B., and Taylor, F. (2016). Refractory and semi-volatile organics at the surface of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko : Insights from the VIRTIS/Rosetta imaging spectrometer. *Icarus*, 272 :32–47.

Quirico, E., Szopa, C., Cernogora, G., Lees, V., Derenne, S., McMillan, P. F., Montagnac, G., Reynard, B., Rouzaud, J.-N., Fray, N., Coll, P., Raulin, F., Schmitt, B., and Minard, B. (2008). Tholins and their relevance for astrophysical issues. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 4(S251) :409–416.

Ramdohr, P. (1963). The opaque minerals in stony meteorites. *Journal of Geophysical Research*, 68(7) :2011–2036.

Raponi, A. (2013). *Spectrophotometric analysis of cometary nuclei from in situ observations (PhD thesis)*. PhD thesis. Comments : Ph.D. thesis, Università degli studi di Roma Tor Vergata, 2014, 131 pages.

Raponi, A., Ciarniello, M., Capaccioni, F., Filacchione, G., Tosi, F., De Sanctis, M. C., Capria, M. T., Barucci, M. A., Longobardo, A., Palomba, E., Kappel, D., Arnold, G., Mottola, S., Rousseau, B., Quirico, E., Rinaldi, G., Érard, S., Bockelée-Morvan, D., and Leyrat, C. (2016). The temporal evolution of exposed water ice-rich areas on the surface of 67P/Churyumov-Gerasimenko : spectral analysis. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*.

Riedler, W., Torkar, K., Jeszenszky, H., Romstedt, J., Alleyne, H. S. C., Arends, H., Barth, W., Biezen, J. V. D., Butler, B., Ehrenfreund, P., Fehringer, M., Fremuth, G., Gavira, J., Havnes, O., Jessberger, E. K., Kassing, R., Klöck, W., Koeberl, C., Levasseur-Regourd, A. C., Maurette, M., Rüdenauer, F., Schmidt, R., Stangl, G., Steller, M., and Weber, I. (2007). MIDAS the micro-imaging dust analysis system for the Rosetta mission. *Space Science Reviews*, 128 :869–904.

Roger G. Burns, F. E. H. (1972). Cation determinative curves for Mg-Fe-Mn olivines from vibrational spectra. *American Mineralogist*.

Rotundi, A., Sierks, H., Della Corte, V., Fulle, M., Gutierrez, P. J., Lara, L., Barbieri, C., Lamy, P. L., Rodrigo, R., Koschny, D., Rickman, H., Keller, H. U., López-Moreno, J. J., Accolla, M., Agarwal, J., A'Hearn, M. F., Altobelli, N., Angrilli, F., Barucci, M. A., Bertaux, J.-L., Bertini, I., Bodewits, D., Bussoletti, E., Colangeli, L., Cosi, M., Cremonese, G., Crifo, J.-F., Da Deppo, V., Davidsson, B., Debei, S., De Cecco, M., Esposito, F., Ferrari, M., Fornasier, S., Giovane, F., Gustafson, B., Green, S. F., Groussin, O., Grün, E., Güttler, C., Herranz, M. L., Hviid, S. F., Ip, W., Ivanovski, S., Jerónimo, J. M., Jorda, L., Knollenberg, J., Kramm, R., Kührt, E., Küppers, M., Lazzarin, M., Leese, M. R., López-Jiménez, A. C., Lucarelli, F., Lowry, S. C., Marzari, F., Epifani, E. M., McDonnell, J. A. M., Mennella, V., Michalik, H., Molina, A., Morales, R., Moreno, F., Mottola, S., Naletto, G., Oklay, N., Ortiz, J. L., Palomba, E., Palumbo, P., Perrin, J.-M., Rodríguez, J., Sabau, L., Snodgrass, C., Sordini, R., Thomas, N., Tubiana, C., Vincent, J.-B., Weissman, P., Wenzel, K.-P., Zakharov, V., and Zarnecki, J. C. (2015). Dust measurements in the coma of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko inbound to the Sun. *Science*, 347(6220).

Salisbury, J. W. and Wald, A. (1992). The role of volume scattering in reducing spectral contrast of Reststrahlen bands in spectra of powdered minerals. *Icarus*, 96 :121–128.

Sandford, S. A., Aléon, J., Alexander, C. M. O., Araki, T., Bajt, S., Baratta, G. A., Borg, J., Bradley, J. P., Brownlee, D. E., Brucato, J. R., Burchell, M. J., Busemann, H., Butterworth, A., Clemett, S. J., Cody, G., Colangeli, L., Cooper, G., D'Hendecourt, L., Djouadi, Z., Dworkin, J. P., Ferrini, G., Fleckenstein, H., Flynn, G. J., Franchi, I. A., Fries, M., Gilles, M. K., Glavin, D. P., Gounelle, M., Grossemy, F., Jacobsen, C., Keller, L. P., Kilcoyne, A. L. D., Leitner, J., Matrajt, G., Meibom, A., Mennella, V., Mostefaoui, S., Nittler, L. R., Palumbo, M. E., Papanastassiou, D. A., Robert, F., Rotundi, A., Snead, C. J., Spencer, M. K., Stadermann, F. J., Steele, A., Stephan, T., Tsou, P., Tyliszczak, T., Westphal, A. J., Wirick, S., Wopenka, B., Yabuta, H., Zare, R. N., and Zolensky, M. E. (2006). Organics captured from comet 81P/Wild 2 by the Stardust spacecraft. *Science*, 314(5806) :1720–1724.

Saunders, R. S., Fanale, F. P., Parker, T. J., Stephens, J. B., and Sutton, S. (1986). Properties of filamentary sublimation residues from dispersions of clay in ice. *Icarus*, 66(1) :94–104.

Schmidt, F. and Fernando, J. (2015). Realistic uncertainties on Hapke model parameters from photometric measurement. *Icarus*, 260 :73–93.

Schmitt, B., Espinasse, S., Grim, R., Greenberg, J., and Klinger, J. (1989). Laboratory studies of cometary ice analogues. In Hunt, J. and Guyenne, T., editors, *Physics and Mechanics of Cometary Materials*, volume 302 of *ESA Special Publication*, pages 65–69.

Schroder, S. E., Grynko, Y., Pommerol, A., Keller, H., Thomas, N., and Roush, T. (2014). Laboratory observations and simulations of phase reddening. *Icarus*, 239 :201–216.

Schulz, R. and Tozzi, G.-P. (2009). Comets. *Landolt Börnstein*.

Schulze, H., Kissel, J., and Jessberger, E. (1997). Chemistry and Mineralogy of Comet Halley's Dust. In Pendleton, Y., editor, *From Stardust to Planetesimals*, volume 122 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 397.

Sears, D. W. G., Kochan, H. W., and Huebner, W. F. (1999). Laboratory simulation of the physical processes occurring on and near the surfaces of comet nuclei. *Meteoritics & Planetary Science*, 34(4) :497–525.

Shepard, M. K. and Campbell, B. A. (1998). Shadows on a planetary surface and implications for photometric roughness. *Icarus*, 134 :279–291.

Shepard, M. K. and Helfenstein, P. (2007). A test of the Hapke photometric model. *Journal of Geophysical Research*, 112(E3) :E03001–.

Shkuratov, Y., Kaydash, V., Korokhin, V., Velikodsky, Y., Petrov, D., Zubko, E., Stankevich, D., and Videen, G. (2012). A critical assessment of the Hapke photometric model. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 113 :2431–2456.

Shkuratov, Y., Starukhina, L., Hoffmann, H., and Arnold, G. (1999). A model of spectral albedo of particulate surfaces : Implications for optical properties of the moon. *Icarus*, 137(2) :235–246.

Shkuratov, Y. G., Stankevich, D. G., Petrov, D. V., Pinet, P. C., Cord, A. M., Daydou, Y. H., and Chevrel, S. D. (2005). Interpreting photometry of regolith-like surfaces with different topographies : shadowing and multiple scattering. *Icarus*, 173 :3–15.

Sierks, H., Barbieri, C., Lamy, P. L., Rodrigo, R., Koschny, D., Rickman, H., Keller, H. U., Agarwal, J., A'Hearn, M. F., Angrilli, F., Auger, A.-T., Barucci, M. A., Bertaux, J.-L., Bertini, I., Besse, S., Bodewits, D., Capanna, C., Cremonese, G., Da Deppo, V., Davidsson, B., Debei, S., De Cecco, M., Ferri, F., Fornasier, S., Fulle, M., Gaskell, R., Giacomini, L., Groussin, O., Gutierrez-Marques, P., Gutiérrez, P. J., Güttler, C., Hoekzema, N., Hviid, S. F., Ip, W.-H., Jorda, L., Knollenberg, J., Kovacs, G., Kramm, J. R., Kührt, E., Küppers, M., La Forgia, F., Lara, L. M., Lazzarin, M., Leyrat, C., Lopez Moreno, J. J., Magrin, S., Marchi, S., Marzari, F., Massironi, M., Michalik, H., Moissl, R., Mottola, S., Naletto, G., Oklay, N., Pajola, M., Pertile, M., Preusker, F., Sabau, L., Scholten, F., Snodgrass, C., Thomas, N., Tubiana, C., Vincent, J.-B., Wenzel, K.-P., Zaccariotto, M., and Patzold, M. (2015). On the nucleus structure and activity of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. *Science*, 347(6220).

Singer, R. B. (1981). Near-infrared spectral reflectance of mineral mixtures : Systematic combinations of pyroxenes, olivine, and iron oxides. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 86(B9) :7967–7982.

Soderblom, L. A., Becker, T. L., Bennett, G., Boice, D. C., Britt, D. T., Brown, R. H., Buratti, B. J., Isbell, C., Giese, B., Hare, T., Hicks, M. D., Howington-Kraus, E., Kirk, R. L., Lee, M., Nelson, R. M., Oberst, J., Owen, T. C., Rayman, M. D., Sandel, B. R., Stern, S. A., Thomas, N., and Yelle, R. V. (2002). Observations of comet 19P/Borrelly by the miniature integrated camera and spectrometer aboard Deep Space 1. *Science*, 296(5570) :1087.

Souchon, A. (2012). *Influence des phases amorphes dans la réponse optique des régolites planétaires : caractérisation des propriétés physiques et application Ã l'étude géologique de la Lune*. Thèse, Université Paul Sabatier - Toulouse III.

Souchon, A., Pinet, P., Chevrel, S., Daydou, Y., Baratoux, D., Kurita, K., Shepard, M., and Helfenstein, P. (2011). An experimental study of Hapke's modeling of natural granular surface samples. *Icarus*, 215(1) :313–331.

Stephens, J. R. and Gustafson, B. Å. S. (1991). Laboratory reflectance measurements of analogues to "dirty" ice surfaces on atmosphereless Solar System bodies. *Icarus*, 94(1) :209–217.

Stomp, M., Huisman, J., Stal, L. J., and Matthijs, H. C. (2007). Colorful niches of phototrophic microorganisms shaped by vibrations of the water molecule. *The ISME journal*, 1(4) :271–282.

Storrs, A. D., Fanale, F. P., Saunders, R. S., and Stephens, J. B. (1988). The formation of filamentary sublimate residues (fsr) from mineral grains. 76(3) :493–512.

Sunshine, J. M., A'Hearn, M. F., Groussin, O., Li, J.-Y., Belton, M. J. S., Delamere, W. A., Kissel, J., Klaasen, K. P., McFadden, L. A., Meech, K. J., Melosh, H. J., Schultz, P. H., Thomas, P. C., Veverka, J., Yeomans, D. K., Busko, I. C., Desnoyer, M., Farnham, T. L., Feaga, L. M., Hampton, D. L., Lindler, D. J., Lisse, C. M., and Wellnitz, D. D. (2006). Exposed water ice deposits on the surface of comet 9P/Tempel 1. *Science*, 311(5766) :1453–1455.

Sutton, S. (1986). Properties of residues from sublimed dirty ice. In *NASA Tech. Memo., NASA TM-88784*, volume 1, pages 393–397.

Sykes, M. V. and Walker, R. G. (1992). Cometary dust trails. 95(2) :180–210.

Taquet, V., Furuya, K., Walsh, C., and van Dishoeck, E. F. (2016). A primordial origin for molecular oxygen in comets : a chemical kinetics study of the formation and survival of O2 ice from clouds to discs. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 462(Suppl 1) :S99–S115.

Thomas, K. L., Blanford, G. E., Keller, L. P., Klöck, W., and McKay, D. S. (1993). Carbon abundance and silicate mineralogy of anhydrous interplanetary dust particles. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(7) :1551–1566.

Thomas, N. and Keller, H. (1989). The colour of Comet P/Halley's nucleus and dust. *Astronomy and Astrophysics*, 213 :487–494.

Thomas, N., Sierks, H., Barbieri, C., Lamy, P. L., Rodrigo, R., Rickman, H., Koschny, D., Keller, H. U., Agarwal, J., A'Hearn, M. F., Angrilli, F., Auger, A.-T., Barucci, M.-A., Bertaux, J.-L., Bertini, I., Besse, S., Bodewits, D., Cremonese, G., Da Deppo, V., Davidsson, B., De Cecco, M., Debei, S., El-Maarry, M. R., Ferri, F., Fornasier, S., Fulle, M., Giacomini, L., Groussin, O., Gutierrez, P. J., Güttler, C., Hviid, S. F., Ip, W.-H., Jorda, L., Knollenberg, J., Kramm, J.-R., Kührt, E., Küppers, M., La Forgia, F., Lara, L. M., Lazzarin, M., Moreno, J. J. L., Magrin, S., Marchi, S., Marzari, F., Massironi, M., Michalik, H., Moissl, R., Mottola, S., Naletto, G., Oklay, N., Pajola, M., Pommerol, A., Preusker, F., Sabau, L., Scholten, F., Snodgrass, C., Tubiana, C., Vincent, J.-B., and Wenzel, K.-P. (2015). The morphological diversity of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. *Science*, 347(6220).

Thomas, P., A'Hearn, M., Belton, M. J. S., Brownlee, D., Carcich, B., Hermalyn, B., Klaasen, K., Sackett, S., Schultz, P. H., Veverka, J., Bhaskaran, S., Bodewits, D., Chesley, S., Clark, B., Farnham, T., Groussin, O., Harris, A., Kissel, J., Li, J.-Y., Meech, K., Melosh, J., Quick, A., Richardson, J., Sunshine, J., and Wellnitz, D. (2013). The nucleus of comet 9P/Tempel 1 : Shape and geology from two flybys. *Stardust/EPOXI*, 222(2) :453–466.

Thomas, P. C., Veverka, J., Belton, M. J., Hidy, A., A'Hearn, M. F., Farnham, T., Groussin, O., Li, J.-Y., McFadden, L. A., Sunshine, J., Wellnitz, D., Lisse, C., Schultz, P., Meech, K. J., and Delamere, W. A. (2007). The shape, topography, and geology of Tempel 1 from deep impact observations. *Icarus*, 187(1) :4–15.

Thomas, N., Davidsson, B., El-Maarry, M. R., Fornasier, S., Giacomini, L., Gracia-Berná, A. G., Hviid, S. F., Ip, W.-H., Jorda, L., Keller, H. U., Knollenberg, J., Kührt, E., La Forgia, F., Lai, I. L., Liao, Y., Marschall, R., Massironi, M., Mottola, S., Pajola, M., Poch, O., Pommerol, A., Preusker, F., Scholten, F., Su, C. C., Wu, J. S., Vincent, J.-B., Sierks, H., Barbieri, C., Lamy, P. L., Rodrigo, R., Koschny, D., Rickman, H., A'Hearn, M. F., Barucci, M. A., Bertaux, J.-L., Bertini, I., Cremonese, G., Da Deppo, V., Debei, S., de Cecco, M., Fulle, M., Groussin, O., Gutierrez, P. J., Kramm, J.-R., Küppers, M., Lara, L. M., Lazzarin, M., Lopez Moreno, J. J., Marzari, F., Michalik, H., Naletto, G., Agarwal, J., Güttler, C., Oklay, N., and Tubiana, C. (2015). Redistribution of particles across the nucleus of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. *A&A*, 583 :A17.

Tosi, F., Capria, M., De Sanctis, M., Combe, J.-P., Zambon, F., Nathues, A., Schröder, S., Li, J.-Y., Palomba, E., Longobardo, A., Blewett, D., Denevi, B., Palmer, E., Capaccioni, F., Ammannito, E., Titus, T., Mittlefehldt, D., Sunshine, J., Russell, C., and Raymond, C. (2014). Thermal measurements of dark and bright surface features on Vesta as derived from DAWN/VIR. *Icarus*, 240 :36–57.

van de Hulst, H. C. (1957). *Light Scattering by Small Particles*.

Vincent, J.-B., Bodewits, D., Besse, S., Sierks, H., Barbieri, C., Lamy, P., Rodrigo, R., Koschny, D., Rickman, H., Keller, H. U., Agarwal, J., A'Hearn, M. F., Auger, A.-T., Barucci, M. A., Bertaux, J.-L., Bertini, I., Capanna, C., Cremonese, G., Da Deppo, V., Davidsson, B., Debei, S., De Cecco, M., El-Maarry, M. R., Ferri, F., Fornasier, S., Fulle, M., Gaskell, R., Giacomini, L., Groussin, O., Guilbert-Lepoutre, A., Gutierrez-Marques, P., Gutierrez, P. J., Guttler, C., Hoekzema, N., Hofner, S., Hviid, S. F., Ip, W.-H., Jorda, L., Knollenberg, J., Kovacs, G., Kramm, R., Kuhrt, E., Kuppers, M., La Forgia, F., Lara, L. M., Lazzarin, M., Lee, V., Leyrat, C., Lin, Z.-Y., Lopez Moreno, J. J., Lowry, S., Magrin, S., Maquet, L., Marchi, S., Marzari, F., Massironi, M., Michalik, H., Moissl, R., Mottola, S., Naletto, G., Oklay, N., Pajola, M., Preusker, F., Scholten, F., Thomas, N., Toth, I., and Tubiana, C. (2015). Large heterogeneities in comet 67P as revealed by active pits from sinkhole collapse. *Nature*, 523(7558) :63–66.

Vincent, R. K. and Hunt, G. R. (1968). Infrared reflectance from mat surfaces. *Applied Optics*, 7 :53.

Walsh, K. J., Morbidelli, A., Raymond, S. N., O'Brien, D. P., and Mandell, A. M. (2011). A low mass for Mars from Jupiter's early gas-driven migration. *Nature*, 475 :206–209.

Whipple, F. (1950). A comet model. i. The acceleration of comet encke. *Astrophysical Journal*, 111 :375–394.

Whipple, F. (1951). A Comet Model. II. Physical Relations for Comets and Meteors. *The Astrophysical Journal*, 113 :464.

Whipple, F. (1955). A Comet Model. III. The Zodiacal Light. *The Astrophysical Journal*, 121 :750.

Whipple, F. L. (1967). On maintaining the meteoritic complex. *SAO Special Report*, 239 :1.

Wooden, D., Woodward, C., and Harker, D. (2004). Discovery of Crystalline Silicates in Comet C/2001 Q4 (NEAT). *Astrophysical Journal Letters*, 612 :L77–L80.

Wooden, D. H. (2008). Cometary refractory grains : Interstellar and nebular sources. *Space Science Reviews*, 138 :75–108.

Wooten, F. (1972). *Optical properties of solids*. Academic press.

Yoldi, Z., Pommerol, A., Jost, B., Poch, O., Gouman, J., and Thomas, N. (2015). VIS-NIR reflectance of water ice / regolith analogue mixtures and implications for the detectability of ice mixed within planetary regoliths. *Geophys. Res. Lett.*

Zolensky, M., Nakamura-Messenger, K., Rietmeijer, F., Leroux, H., Mikouchi, T., Ohsumi, K., Simon, S., Grossman, L., Stephan, T., Weisberg, M., Velbel, M., Zega, T., Stroud, R., Tomeoka, K., Ohnishi, I., Tomioka, N., Nakamura, T., Matrajt, G., Joswiak, D., Brownlee, D., Langenhorst, F., Krot, A., Kearsley, A., Ishii, H., Graham, G., Dai, Z. R., Chi, M., Bradley, J., Hagiya, K., Gounelle, M., Keller, L., and Bridges, J. (2008). Comparing Wild 2 particles to chondrites and IDPs. *Meteoritics & Planetary Science*, 43(1-2) :261–272.

Zolensky, M. E., Zega, T. J., Yano, H., Wirick, S., Westphal, A. J., Weisberg, M. K., Weber, I., Warren, J. L., Velbel, M. A., Tsuchi yama, A., Tsou, P., Toppani, A., Tomioka, N., Tomeoka, K., Teslich, N., Taheri, M., Susini, J., Stroud, R., Stephan, T., Stadermann, F. J., Snead, C. J., Simon, S. B., Simionovici, A., See, T. H., Robert, F., Rietmeijer, F. J. M., Rao, W., Perronnet, M. C., Papanastassiou, D. A., Okudaira, K., Ohsumi, K., Ohnishi, I., Nakamura-Messenger, K., Nakamura, T., Mostefaoui, S., Mikouchi, T., Meibom, A., Matrajt, G., Marcus, M. A., Leroux, H., Lemelle, L., Le, L., Lanzirotti, A., Langenhorst, F., Krot, A. N., Keller, L. P., Kearsley, A. T., Joswiak, D., Jacob, D., Ishii, H., Harvey, R., Hagiya, K., Grossman, L., Grossman, J. N., Graham, G. A., Gounelle, M., Gillet, P., Genge, M. J., Flynn, G., Ferroir, T., Fallon, S., Ebel, D. S., Dai, Z. R., Cordier, P., Clark, B., Chi, M., Butterworth, A. L., Brownlee, D. E., Bridges, J. C., Brennan, S., Brearley, A., Bradley, J. P., Bleuet, P., Bland, P. A., and Bastien, R. (2006). Mineralogy and petrology of comet 81P/Wild 2 nucleus samples. *Science*, 314(5806) :1735–1739.

Table des figures

1.1 Diagramme d'Euler classant les catégories d'objets du Système Solaire. 10

1.2 Représentation schématique de notre Système Solaire à différentes échelles. 13

1.3 Schéma illustrant le transport radial dans la nébuleuse solaire. 15

2.1 La comète C/1995 O1 (Hale-Bopp) lors de son passage en 1997. Waouh ! 18

2.2 Les noyaux cométaires visitées par des sondes spatiales. #la3Dsanslunettes 20

2.3 Détection de la glace d'eau sur Tempel 1. 21

2.4 Modèle schématique de la structure d'un noyau cométaire. 22

2.5 Image de la surface de 67P 23

2.6 Cible d'aérogel permettant de capturer les grains de la comète Wild 2 et grains visibles dans le gel. 24

2.7 Poussière capturées provenant de la queue de la comètes Wild 2. 25

2.8 Images au MEB d'une IDP et au MET d'une UCAMM. #laviesansacronymes 26

2.9 Images TEM de grains de la comète Wild 2 et particules proches des GEMS. 27

3.1 Dates clés de la mission Rosetta. 30

3.2 Les principales caractéristiques de 67P/Chruryumov-Gerasimenko. 31

3.3 Le rapport D/H de plusieurs corps du Système Solaire. 32

3.4 Rosetta et Philae 36

3.5 Taux de production en eau calculé grâce aux données de MIRO. Glouglou. 37

3.6 Une comète haute en couleurs ! 38

3.7 Images OSIRIS montrant la diversité des terrains rencontrés à la surface de 67P. 39

3.8 Images et spectres VIRTIS. 40

3.9 Cycle diurne de l'eau. Retrait du givre au levé du jour. 42

4.1 Schéma de principe de l'imagerie hyperspectrale. 50

4.2 Modes de fonctionnement des imageurs hyperspectraux. 51

4.3 Les différents modes de vibrations de la molécules d'eau. 52

4.4 Indicateurs spectroscopiques calculé sur un spectre d'olivine. 53

4.5 Schéma de VIRTIS. 54

4.6 Les champs de vue des instruments de Rosetta et de VIRTIS. 55

4.7 Design optique de VIRTIS-M. Le miroir M1 est pivotant, permettant de scanner la surface. 56

4.8 Schéma de la structure de VIRTIS-M. 57

4.9 Design optique de VIRTIS-H. 58

4.10 Projection des ordres spectraux de VIRTIS-H sur le capteur et résolution 58

4.11 Résolution spectral des ordres en fonction de la longueur d'onde. 59

4.12 Matrice infrarouge de VIRTIS-H. 60

4.13 Spectre brut illustrant l'effet du filtre utilisé pour limiter le signal IR. 62

4.14 Illustration de l'effet pair-impair sur un spectre VIRTIS-H. 63

4.15 De l'ombre à la lumière avec VIRTIS-H. 64

4.16 Illustration du problème de la lumière diffusée. 65

4.17 Moyenne temporelle des écarts type des observations VIRTIS-H noyaux entre MTP006 et MTP017. 66

4.18 Altitude de la sonde par rapport à 67P et distance héliocentrique au cours de la mission (données VIRTIS). 67

4.19 Distance au Soleil et taux de production des gaz de 67P. 68

4.20 Latitude sub-solaire en fonction de la distance héliocentrique 68

4.21 Carte de densité et histogrammes des géométries d'observations et de leurs résolutions pour MTP006 et VIRTIS-M infrarouge. 72

4.22 Exemple d'aperçus pour VIRTIS-H et VIRTIS-M. 73

5.1 Schéma illustrant la diffusion de la lumière par une surface particulaire. 76

5.2 Angles liés à l'observation en orbite. 77

5.3 Photographies illustrant l'effet d'opposition. 79

5.4 Effet de la fonction de phase et de la rugosité macroscopique sur la réflectance. 86

5.5 Observations VIRTIS-M visible retenues pour l'étude globale des paramètres photométriques. 89

5.6 Observations VIRTIS-M infrarouge retenues pour l'étude globale des paramètres photométriques. 90

5.7 Densité de la réflectance des observations VIRTIS-M visible à 0.55 µm retenues pour l'étude photométrique couvrant MTP006 à MTP012. 91

5.8 Densité de la réflectance des observations VIRTIS-M infrarouge à 2.3 µm retenues pour l'étude photométrique couvrant MTP006 à MTP012. 92

5.9 Représentation des valeurs de l'équation 5.11 pour différents $\bar{\theta}$ testés. 93

5.10 Résidus normalisés en fonction de $\bar{\theta}$ pour VIRTIS-M visible et infrarouge. 94

5.11 Albédo de diffusion simple et paramètre d'asymétrie globale de 67P/CG entre août 2014 et février 2015 dérivés à partir de l'équation 5.10. 95

5.12 Carte des régions de 67P. 96

5.13 Carte de l'albédo de diffusion simple à 0.55 µm. 97

5.14 Carte de l'albédo de diffusion simple à 0.55 µm. 98

5.15 Carte des pentes spectrales calculées à partir des observations VIRTIS-M entre MTP006 et MTP012. 99

5.16 Carte des pentes spectrales calculées à partir des observations VIRTIS-M entre MTP006 et MTP012. 100

5.17 Observations VIRTIS-H retenues pour l'étude globale des paramètres photométriques. . 101

5.18 Densité de la réflectance à 2.3 µm des observations VIRTIS-H retenues pour l'étude photométrique couvrant MTP006 à MTP012. 102

5.19 Représentation des valeurs de $\omega P(g)$ pour les différentes valeurs de $\bar{\theta}$ testées pour VIRTIS-H à 2.3 µm. 103

5.20 Résidus normalisés en fonction de pour VIRTIS-H. 103

5.21 Albédo de diffusion simple (SSA) pour MTP006-MTP012 à partir des observations VIRTIS-M et H. 104

5.22 Paramètres d'asymétrie (B) pour MTP006-MTP012 à partir des observations VIRTIS-M et H. 104

5.23 Albédo de diffusion simple (SSA) global de 67P/CG entre août 2014 et février 2015 dérivés à partir de l'équation 5.10. 105

5.24 Paramètre d'asymétrie (b) global de 67P/CG entre août 2014 et février 2015 dérivés à partir de l'équation 5.10. 105

5.25 Albédos de diffusion simple dérivés avec le modèle de Lommel-Seeliger et Hapke simplifié et avec une fonction de phase à deux lobes. 106

5.26 Paramètres d'asymétrie dérivés avec le modèle de Lommel-Seeliger et Hapke simplifié et avec une fonction de phase à deux lobes. 107

5.27 Fractions de rétrodiffusion dérivés avec le modèle de Lommel-Seeliger et Hapke simplifié et avec une fonction de phase à deux lobes. 107

5.28 Les paramètres b et c retranscrits pour de nombreuses expériences ou observations. (a) issu de Souchon et al. (2011), (b) issu de Hapke (2012). 108

5.29 Écarts relatifs des albédos de diffusion simple dérivés pour VIRTIS-M (losange) et VIRTIS-H (croix) avec les modèles de Lommel-Seeliger et Hapke et avec une fonction de phase à un lobe (vert) et à deux lobes (violet). 110

5.30 Écarts relatifs des albédos de diffusion simple dérivés pour VIRTIS-M (losange) et VIRTIS-H (croix) avec les modèles de Lommel-Seeliger (orange) et Hapke (bleu). L'écart est ici selon la version de la fonction de phase mais chacun des modèles pris séparément. 110

5.31 Vu rapprochée de 67P prise par OSIRIS, à 8.9 km la résolution atteint ici 17 cm/pixel. . . 111

5.32 Mosaïque d'image OSIRIS et carte géologique de la région d'Imhotep. 113

5.33 Cube VIRTIS où la région d'Imhotep est visible. 114

5.34 Densité (échelle normalisée) des observations VIRTIS-M visible et infrarouge retenues pour l'étude photométrique d'Imhotep. 115

5.35 Paramètres photométriques des terrains couverts lisses ou irréguliers sélectionnés dans la région d'Imhotep. 117

5.36 Images OSIRIS de la NAC (« *Narrow angle camera* ») illustrant les terrains sélectionnés pour l'étude locale. 118

6.1 Observations VIRTIS-H en mode *raster*. 122

6.2 Réflectance et température des observations VIRTIS-M utilisé pour l'étude thermique. . 125

6.3 Écart entre les températures VIRTIS-M normalisées par les températures VIRTIS-H avec ou sans prise en compte du décalage spatial entre les champs de vue. 126

6.4 Comparaison des températures entre les observations VIRTIS-M et VIRTIS-H. 127

6.5 Images de poussières de l'expérience KOSI-3. 137

7.1 Le spectro-gonio-radiomètre de l'IPAG. 141

7.2 Modes d'observations du spectro-gonio-radiomètre. 142

7.3 Spectres de surfaces lambertiennes absorbantes. 143

7.4 Sensibilité du spectro-gonio-radiomètre, spectre de Spectralon. 144

7.5 Cartographie des observations VIRTIS-M sélectionnées pour l'étude expérimentale. . . . 147

7.6 Spectre VIRTIS de référence utilisé pour l'étude expérimentale. 148

7.7 Spectres de réflectance de différents charbons (PSOC 1532) et goudrons (CT). 150

7.8 Spectres de détection des ions sur les poussières Kenneth et Juliette de la comète 67P par l'instrument COSIMA de la sonde Rosetta. 151

7.9 Photographies des échantillons de cristaux de pyrite et de pyrrhotite. 153

7.10 Allumer le feu ! 154

7.11 Spectres des matériaux pures utilisés lors des expériences : dunites, PSOC 1532, pyrite et pyrrhotite. 155

7.12 Spectres de poudres de pyrrhotite utilisées lors des expériences. 156

7.13 Comparaison des spectres de pyrrhotite oxydée et non oxydée. 157

7.14 Spectre et photographie de la dunite 2 dans son état original (taille < 80 µm). 160

7.15 Photographies MEB de poussière interplanétaire (IDPs) et de micrométéorites (UCAMM). 162

7.16 Caractéristiques et photographies de poussières collectés dans la coma de 67P par MIDAS, COSIMA et GIADA. 163

7.17 Broyeurs et principe de fonctionnement. 164

7.18 Protocole pour le broyage planétaire. 165

7.19 Spectres illustrant l'impact d'un mélange intime ou d'un mélange spatial. 167

7.20 Photographies d'un mélange spatial ou intime entre du PSOC 1532 et de la dunite. Photographie d'un agrégat de PSOC 1532 recouvert de pyrrhotite. 167

7.21 Photographies MEB de PSOC 1532. 169

7.22 Photographies MEB de pyrrhotite et de dunite. 170

8.1 Spectres de PSOC 1532 de différente granulométrie. 173

8.2 Spectres en réflectance de PSOC 1532. 174

8.3 Photographies d'échantillons de PSOC 1532. 175

8.4 8.5Spectres en réflectance de poudre de pyrrhotite. 176

8.5 Photos binoculaires des échantillons B et C de la figure 176

8.6 Spectre en réflectance des échantillons de dunite 1 et 2 à différentes tailles. 177

8.7 Photos des échantillons de dunite 2 réalisées à la binoculaire correspondant à la figure 8.6. 178

8.8 Spectres des mélanges intime et spatial de dunite et de PSOC 1532, accompagnés des composés pures. 179

8.9 Photos binoculaires des mélanges spatial et intime du PSOC 1532 et de la dunite. 179

8.10 Spectre des deux types de mélanges de la pyrrhotite avec la dunite. 181

8.11 Photos binoculaires des mélanges de pyrrhotite et dunite 181

8.12 Mélange binaire PSOC 1532/pyrrhotite. 183

8.13 Spectres et photos binoculaires du mélange ternaire PSOC 1532-pyrrhotite-dunite.Mélange ternaire PSOC 1532/dunite/pyrrhotite. 185

8.14 Mélange binaire mixte PSOC 1532/pyrrhotite. Pyrrhotite en différentes proportions. . . . 187

8.15 Mélange binaire mixte PSOC 1532/pyrrhotite. PSOC 1532 venant de différents protocoles. 189

8.16 Photos binoculaires des mélanges de PSOC 1532/pyrrhotite. 190

8.17 Spectres des mélanges de PSOC 1532, pyrrhotite et dunite avec une proportions de dunite croissante. 190

9.1 Schéma de l'interaction rayonnement/matière à l'échelle d'un grain et à l'échelle de la surface. 192

9.2 Paramètres optiques de la pyrrhotite, de la troïlite et de l'olivine entre 0.3 µm et 1.1 µm. . 194

9.3 Paramètre de taille balayés relatif à l'expérience. 195

9.4 Spectres d'échantillons d'olivine de différentes granulométries. 198

9.5 Influence spectrale due à la présence de petites particules à la surface de grains plus grossiers. 199

9.6 Structure en château de fée (*fairy castle*) pour différent échantillons broyés très finement. 201

9.7 Schéma illustrant un mélange linéaire entre deux spectres de la météorite ferreuse de Canyon Diablo. 203

9.8 Spectre en réflectance de poudres de troïlite avec différentes tailles de grains. 205

9.9 Spectres illustrant l'impact d'un composé sombre dans un mélange avec un composé clair. 207

9.10 Mélanges de tailles variées de montmorillonite avec une quantité croissante d'anthracite. 207

9.11 Photographie d'agrégats de dunite et de PSOC 1532 recouverts de pyrrhotite. 209

9.12 Spectres de mélanges de PSOC 1532 et de pyrrhotite avec ou sans dunite. 211

9.13 Comparaison entre mélanges binaires de PSOC 1532 et pyrrhotite. 213

9.14 Croute de dessiccation de pyrrhotite et agrégats de dunite. 327

Liste des tableaux

3.1 Résumé des instruments de Rosetta. 34

3.2 Résumé des instruments de Philae. 35

5.1 Évaluation des ajustements entre les modèles de Hapke et Lommel-Seeliger 106

5.2 Paramètres photométriques des zones sélectionnées sur Imhotep (étude photométrique locale). 116

6.1 Cubes VIRTIS-M acquis en mode balayage et cube VIRTIS-H correspondants. 123

7.1 Compositions des échantillons sélectionnés dans l'étude expérimentale. 161

9.1 Caractéristiques techniques de VIRTIS 272

9.2 Cubes VIRTIS-M visible et infrarouge utilisés dans l'étude de la région Imhotep. 324

9.3 Liste des cubes utilisés pour l'assemblage du spectre de référence VIRTIS-M. 325

9.4 Paramètres de broyages. 326

Annexes

Annexe de la partie II

Découpe des phases d'observations de la mission Rosetta

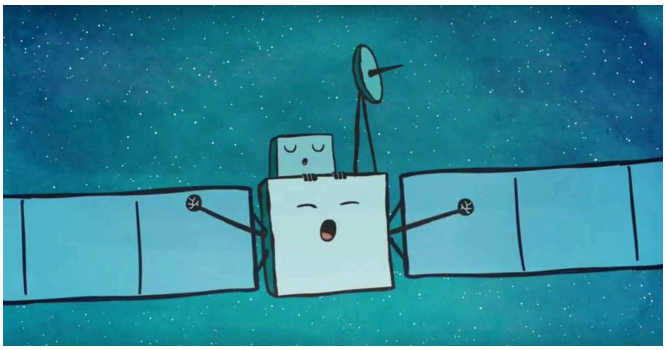
LTP = *Long Term Plan*

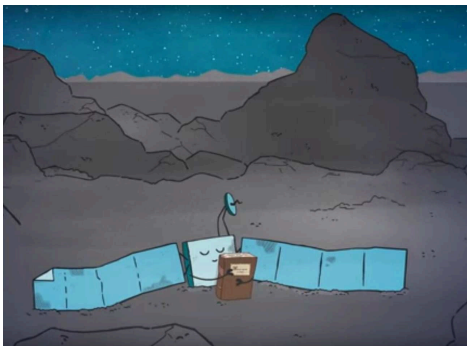
MTP = *Median Term Plan*

STP = *Short Term Plan*

VSTP = Very Short Term Plan

La date de début correspond à la sortie d'hibernation de la sonde. La date de fin correspond à la date d'atterrissage/crash contrôlé le 30 septembre 2016.





LTP	MTP	STP	VSTP	Date de début	Date de fin
LTP001	MTP001	STP001	VSTP0001	17/03/2014 00:00	06/04/2014 23:59
	MTP002	STP002	VSTP0002	07/04/2014 00:00	07/05/2014 12:47
	MTP003	STP003	VSTP0003	07/05/2014 12:48	09/05/2014 12:39
			VSTP0004	09/05/2014 12:40	21/05/2014 11:50
		STP004	VSTP0005	21/05/2014 11:51	23/05/2014 11:41
			VSTP0006	23/05/2014 11:42	04/06/2014 10:49
	MTP004	STP005	VSTP0007	04/06/2014 10:50	06/06/2014 10:39
			VSTP0008	06/06/2014 10:40	18/06/2014 09:43
		STP006	VSTP0009	18/06/2014 09:44	20/06/2014 09:33
			VSTP0010	20/06/2014 09:34	02/07/2014 08:34
	MTP005	STP007	VSTP0011	02/07/2014 08:35	04/07/2014 08:24
			VSTP0012	04/07/2014 08:25	09/07/2014 07:59
		STP008	VSTP0013	09/07/2014 08:00	11/07/2014 07:49
			VSTP0014	11/07/2014 07:50	16/07/2014 07:24
		STP009	VSTP0015	16/07/2014 07:25	18/07/2014 07:14
			VSTP0016	18/07/2014 07:15	23/07/2014 06:49
		STP010	VSTP0017	23/07/2014 06:50	25/07/2014 06:39
			VSTP0018	25/07/2014 06:40	01/08/2014 09:59
	MTP006	STP011	VSTP0019	01/08/2014 10:00	05/08/2014 09:59
		STP012	VSTP0020	05/08/2014 10:00	08/08/2014 09:59
			VSTP0021	08/08/2014 10:00	12/08/2014 09:59
		STP013	VSTP0022	12/08/2014 10:00	15/08/2014 09:59
			VSTP0023	15/08/2014 10:00	19/08/2014 09:59
		STP014	VSTP0024	19/08/2014 10:00	22/08/2014 09:59
			VSTP0025	22/08/2014 10:00	26/08/2014 09:59
		STP015	VSTP0026	26/08/2014 10:00	29/08/2014 09:59
			VSTP0027	29/08/2014 10:00	02/09/2014 09:59
LTP002	MTP007	STP016	VSTP0028	02/09/2014 10:00	05/09/2014 09:59
			VSTP0029	05/09/2014 10:00	09/09/2014 09:59
		STP017	VSTP0030	09/09/2014 10:00	12/09/2014 09:59
			VSTP0031	12/09/2014 10:00	16/09/2014 09:59
		STP018	VSTP0032	16/09/2014 10:00	19/09/2014 09:59
			VSTP0033	19/09/2014 10:00	23/09/2014 09:59
	MTP008	STP019	VSTP0034	23/09/2014 10:00	26/09/2014 09:59
			VSTP0035	26/09/2014 10:00	28/09/2014 09:59
		STP020	VSTP0036	28/09/2014 10:00	01/10/2014 09:59
			VSTP0037	01/10/2014 10:00	03/10/2014 09:59
		STP021	VSTP0038	03/10/2014 10:00	07/10/2014 09:59
		STP022	VSTP0039	07/10/2014 10:00	10/10/2014 09:59
			VSTP0040	10/10/2014 10:00	14/10/2014 09:59
		STP023	VSTP0041	14/10/2014 10:00	17/10/2014 09:59
			VSTP0042	17/10/2014 10:00	21/10/2014 09:59
		STP024	VSTP0043	21/10/2014 10:00	24/10/2014 09:59

LTP003	MTP009	STP025	VSTP0044	24/10/2014 10:00	27/10/2014 09:59
			VSTP0045	27/10/2014 10:00	30/10/2014 09:59
		STP026	VSTP0046	30/10/2014 10:00	02/11/2014 09:59
			VSTP0047	02/11/2014 10:00	05/11/2014 09:59
		STP027	VSTP0048	05/11/2014 10:00	07/11/2014 09:59
			VSTP0049	07/11/2014 10:00	08/11/2014 23:59
			VSTP0050	09/11/2014 00:00	10/11/2014 23:59
		STP028	VSTP0051	11/11/2014 00:00	12/11/2014 03:59
			VSTP0052	12/11/2014 04:00	12/11/2014 17:54
			VSTP0053	12/11/2014 17:55	14/11/2014 04:24
			VSTP0054	14/11/2014 04:25	16/11/2014 04:24
			VSTP0055	16/11/2014 04:25	18/11/2014 23:24
		STP029	VSTP0056	18/11/2014 23:25	21/11/2014 23:24
	MTP010	STP030	VSTP0057	21/11/2014 23:25	25/11/2014 23:24
		STP031	VSTP0058	25/11/2014 23:25	28/11/2014 23:24
			VSTP0059	28/11/2014 23:25	02/12/2014 23:24
		STP032	VSTP0060	02/12/2014 23:25	05/12/2014 23:24
			VSTP0061	05/12/2014 23:25	09/12/2014 23:24
		STP033	VSTP0062	09/12/2014 23:25	12/12/2014 23:24
			VSTP0063	12/12/2014 23:25	16/12/2014 23:24
		STP034	VSTP0064	16/12/2014 23:25	19/12/2014 23:24
LTP004	MTP011	STP035	VSTP0065	19/12/2014 23:25	23/12/2014 23:24
		STP036	VSTP0066	23/12/2014 23:25	27/12/2014 11:24
			VSTP0067	27/12/2014 11:25	30/12/2014 23:24
		STP037	VSTP0068	30/12/2014 23:25	03/01/2015 11:24
			VSTP0069	03/01/2015 11:25	06/01/2015 23:24
		STP038	VSTP0070	06/01/2015 23:25	09/01/2015 23:24
			VSTP0071	09/01/2015 23:25	13/01/2015 23:24
	MTP012	STP039	VSTP0072	13/01/2015 23:25	16/01/2015 23:24
			VSTP0073	16/01/2015 23:25	20/01/2015 23:24
		STP040	VSTP0074	20/01/2015 23:25	23/01/2015 23:24
			VSTP0075	23/01/2015 23:25	27/01/2015 23:24
		STP041	VSTP0076	27/01/2015 23:25	30/01/2015 23:24
			VSTP0077	30/01/2015 23:25	03/02/2015 23:24
		STP042	VSTP0078	03/02/2015 23:25	06/02/2015 23:24
			VSTP0079	06/02/2015 23:25	10/02/2015 23:24
	MTP013	STP043	VSTP0080	10/02/2015 23:25	13/02/2015 23:24
			VSTP0081	13/02/2015 23:25	17/02/2015 23:24
		STP044	VSTP0082	17/02/2015 23:25	20/02/2015 23:24
			VSTP0083	20/02/2015 23:25	24/02/2015 23:24
		STP045	VSTP0084	24/02/2015 23:25	27/02/2015 23:24
			VSTP0085	27/02/2015 23:25	03/03/2015 23:24
		STP046	VSTP0086	03/03/2015 23:25	06/03/2015 23:24
			VSTP0087	06/03/2015 23:25	10/03/2015 23:24

LTP005	MTP014	STP047	VSTP0088	10/03/2015 23:25	13/03/2015 23:24
			VSTP0089	13/03/2015 23:25	17/03/2015 23:24
		STP048	VSTP0090	17/03/2015 23:25	20/03/2015 23:24
			VSTP0091	20/03/2015 23:25	24/03/2015 23:24
		STP049	VSTP0092	24/03/2015 23:25	27/03/2015 23:24
			VSTP0093	27/03/2015 23:25	31/03/2015 23:24
		STP050	VSTP0094	31/03/2015 23:25	03/04/2015 23:24
			VSTP0095	03/04/2015 23:25	08/04/2015 11:24
	MTP015	STP051	VSTP0096	08/04/2015 11:25	10/04/2015 23:24
			VSTP0097	10/04/2015 23:25	14/04/2015 23:24
		STP052	VSTP0098	14/04/2015 23:25	17/04/2015 23:24
			VSTP0099	17/04/2015 23:25	21/04/2015 23:24
		STP053	VSTP0100	21/04/2015 23:25	24/04/2015 23:24
			VSTP0101	24/04/2015 23:25	28/04/2015 23:24
		STP054	VSTP0102	28/04/2015 23:25	01/05/2015 23:24
			VSTP0103	01/05/2015 23:25	05/05/2015 23:24
	MTP016	STP055	VSTP0104	05/05/2015 23:25	08/05/2015 23:24
			VSTP0105	08/05/2015 23:25	12/05/2015 23:24
		STP056	VSTP0106	12/05/2015 23:25	15/05/2015 23:24
			VSTP0107	15/05/2015 23:25	19/05/2015 23:24
		STP057	VSTP0108	19/05/2015 23:25	22/05/2015 23:24
			VSTP0109	22/05/2015 23:25	27/05/2015 11:24
		STP058	VSTP0110	27/05/2015 11:25	29/05/2015 23:24
			VSTP0111	29/05/2015 23:25	02/06/2015 23:24
	MTP017	STP059	VSTP0112	02/06/2015 23:25	05/06/2015 23:24
			VSTP0113	05/06/2015 23:25	09/06/2015 23:24
		STP060	VSTP0114	09/06/2015 23:25	12/06/2015 23:24
			VSTP0115	12/06/2015 23:25	16/06/2015 23:24
		STP061	VSTP0116	16/06/2015 23:25	19/06/2015 23:24
			VSTP0117	19/06/2015 23:25	23/06/2015 23:24
		STP062	VSTP0118	23/06/2015 23:25	26/06/2015 23:24
			VSTP0119	26/06/2015 23:25	30/06/2015 23:24
	MTP018	STP063	VSTP0120	30/06/2015 23:25	03/07/2015 23:24
			VSTP0121	03/07/2015 23:25	07/07/2015 23:24
		STP064	VSTP0122	07/07/2015 23:25	10/07/2015 23:24
			VSTP0123	10/07/2015 23:25	14/07/2015 23:24
		STP065	VSTP0124	14/07/2015 23:25	17/07/2015 23:24
			VSTP0125	17/07/2015 23:25	21/07/2015 23:24
		STP066	VSTP0126	21/07/2015 23:25	24/07/2015 23:24
			VSTP0127	24/07/2015 23:25	28/07/2015 23:24
	MTP019	STP067	VSTP0128	28/07/2015 23:25	31/07/2015 23:24
			VSTP0129	31/07/2015 23:25	04/08/2015 23:24
		STP068	VSTP0130	04/08/2015 23:25	07/08/2015 23:24
			VSTP0131	07/08/2015 23:25	11/08/2015 23:24

LTP006		STP069	VSTP0132	11/08/2015 23:25	14/08/2015 23:24
			VSTP0133	14/08/2015 23:25	18/08/2015 23:24
		STP070	VSTP0134	18/08/2015 23:25	21/08/2015 23:24
			VSTP0135	21/08/2015 23:25	25/08/2015 23:24
	MTP020	STP071	VSTP0136	25/08/2015 23:25	28/08/2015 23:24
			VSTP0137	28/08/2015 23:25	01/09/2015 23:24
		STP072	VSTP0138	01/09/2015 23:25	04/09/2015 23:24
			VSTP0139	04/09/2015 23:25	08/09/2015 23:24
		STP073	VSTP0140	08/09/2015 23:25	11/09/2015 23:24
			VSTP0141	11/09/2015 23:25	15/09/2015 23:24
		STP074	VSTP0142	15/09/2015 23:25	18/09/2015 23:24
			VSTP0143	18/09/2015 23:25	22/09/2015 23:24
	MTP021	STP075	VSTP0144	22/09/2015 23:25	25/09/2015 23:24
			VSTP0145	25/09/2015 23:25	29/09/2015 23:24
		STP076	VSTP0146	29/09/2015 23:25	02/10/2015 23:24
			VSTP0147	02/10/2015 23:25	06/10/2015 23:24
		STP077	VSTP0148	06/10/2015 23:25	09/10/2015 23:24
			VSTP0149	09/10/2015 23:25	13/10/2015 23:24
		STP078	VSTP0150	13/10/2015 23:25	16/10/2015 23:24
			VSTP0151	16/10/2015 23:25	20/10/2015 23:24
LTP007	MTP022	STP079	VSTP0152	20/10/2015 23:25	23/10/2015 23:24
			VSTP0153	23/10/2015 23:25	27/10/2015 23:24
		STP080	VSTP0154	27/10/2015 23:25	30/10/2015 23:24
			VSTP0155	30/10/2015 23:25	03/11/2015 23:24
		STP081	VSTP0156	03/11/2015 23:25	06/11/2015 23:24
			VSTP0157	06/11/2015 23:25	10/11/2015 23:24
		STP082	VSTP0158	10/11/2015 23:25	13/11/2015 23:24
			VSTP0159	13/11/2015 23:25	17/11/2015 23:24
	MTP023	STP083	VSTP0160	17/11/2015 23:25	20/11/2015 23:24
			VSTP0161	20/11/2015 23:25	24/11/2015 23:24
		STP084	VSTP0162	24/11/2015 23:25	27/11/2015 23:24
			VSTP0163	27/11/2015 23:25	01/12/2015 23:24
		STP085	VSTP0164	01/12/2015 23:25	04/12/2015 23:24
			VSTP0165	04/12/2015 23:25	08/12/2015 23:24
		STP086	VSTP0166	08/12/2015 23:25	11/12/2015 23:24
			VSTP0167	11/12/2015 23:25	15/12/2015 23:24
	MTP024	STP087	VSTP0168	15/12/2015 23:25	18/12/2015 23:24
			VSTP0169	18/12/2015 23:25	22/12/2015 23:24
		STP088	VSTP0170	22/12/2015 23:25	25/12/2015 23:24
			VSTP0171	25/12/2015 23:25	29/12/2015 23:24
		STP089	VSTP0172	29/12/2015 23:25	01/01/2016 23:24
			VSTP0173	01/01/2016 23:25	05/01/2016 23:24
		STP090	VSTP0174	05/01/2016 23:25	08/01/2016 23:24
			VSTP0175	08/01/2016 23:25	12/01/2016 23:24

LTP008	MTP025	STP091	VSTP0176	12/01/2016 23:25	15/01/2016 23:24
			VSTP0177	15/01/2016 23:25	19/01/2016 23:24
		STP092	VSTP0178	19/01/2016 23:25	22/01/2016 23:24
			VSTP0179	22/01/2016 23:25	26/01/2016 23:24
		STP093	VSTP0180	26/01/2016 23:25	29/01/2016 23:24
			VSTP0181	29/01/2016 23:25	02/02/2016 23:24
		STP094	VSTP0182	02/02/2016 23:25	05/02/2016 23:24
			VSTP0183	05/02/2016 23:25	09/02/2016 23:24
	MTP026	STP095	VSTP0184	09/02/2016 23:25	12/02/2016 23:24
			VSTP0185	12/02/2016 23:25	16/02/2016 23:24
		STP096	VSTP0186	16/02/2016 23:25	19/02/2016 23:24
			VSTP0187	19/02/2016 23:25	23/02/2016 23:24
		STP097	VSTP0188	23/02/2016 23:25	26/02/2016 23:24
			VSTP0189	26/02/2016 23:25	01/03/2016 23:24
		STP098	VSTP0190	01/03/2016 23:25	04/03/2016 23:24
			VSTP0191	04/03/2016 23:25	08/03/2016 23:24
	MTP027	STP099	VSTP0192	08/03/2016 23:25	11/03/2016 23:24
			VSTP0193	11/03/2016 23:25	15/03/2016 23:24
		STP100	VSTP0194	15/03/2016 23:25	18/03/2016 23:24
			VSTP0195	18/03/2016 23:25	22/03/2016 23:24
		STP101	VSTP0196	22/03/2016 23:25	25/03/2016 23:24
			VSTP0197	25/03/2016 23:25	30/03/2016 11:24
		STP102	VSTP0198	30/03/2016 11:25	02/04/2016 11:24
			VSTP0199	02/04/2016 11:25	05/04/2016 23:24
LTP009	MTP028	STP103	VSTP0200	05/04/2016 23:25	08/04/2016 23:24
			VSTP0201	08/04/2016 23:25	12/04/2016 23:24
		STP104	VSTP0202	12/04/2016 23:25	15/04/2016 23:24
			VSTP0203	15/04/2016 23:25	19/04/2016 23:24
		STP105	VSTP0204	19/04/2016 23:25	22/04/2016 23:24
			VSTP0205	22/04/2016 23:25	26/04/2016 23:24
		STP106	VSTP0206	26/04/2016 23:25	29/04/2016 23:24
			VSTP0207	29/04/2016 23:25	03/05/2016 23:24
	MTP029	STP107	VSTP0208	03/05/2016 23:25	06/05/2016 23:24
			VSTP0209	06/05/2016 23:25	10/05/2016 23:24
		STP108	VSTP0210	10/05/2016 23:25	13/05/2016 23:24
			VSTP0211	13/05/2016 23:25	18/05/2016 11:24
		STP109	VSTP0212	18/05/2016 11:25	20/05/2016 23:24
			VSTP0213	20/05/2016 23:25	24/05/2016 23:24
		STP110	VSTP0214	24/05/2016 23:25	27/05/2016 23:24
			VSTP0215	27/05/2016 23:25	31/05/2016 23:24
	MTP030	STP111	VSTP0216	31/05/2016 23:25	03/06/2016 23:24
			VSTP0217	03/06/2016 23:25	07/06/2016 23:24
		STP112	VSTP0218	07/06/2016 23:25	10/06/2016 23:24
			VSTP0219	10/06/2016 23:25	14/06/2016 23:24

		STP113	VSTP0220	14/06/2016 23:25	17/06/2016 23:24
			VSTP0221	17/06/2016 23:25	21/06/2016 23:24
		STP114	VSTP0222	21/06/2016 23:25	24/06/2016 23:24
			VSTP0223	24/06/2016 23:25	28/06/2016 23:24
	MTP031	STP115	VSTP0224	28/06/2016 23:25	01/07/2016 23:24
			VSTP0225	01/07/2016 23:25	05/07/2016 23:24
		STP116	VSTP0226	05/07/2016 23:25	08/07/2016 23:24
			VSTP0227	08/07/2016 23:25	12/07/2016 23:24
		STP117	VSTP0228	12/07/2016 23:25	15/07/2016 23:24
			VSTP0229	15/07/2016 23:25	19/07/2016 23:24
		STP118	VSTP0230	19/07/2016 23:25	22/07/2016 23:24
			VSTP0231	22/07/2016 23:25	26/07/2016 23:24
	MTP032	STP119	VSTP0232	26/07/2016 23:25	29/07/2016 23:24
			VSTP0233	29/07/2016 23:25	02/08/2016 23:24
		STP120	VSTP0234	02/08/2016 23:25	05/08/2016 23:24
			VSTP0235	05/08/2016 23:25	09/08/2016 23:24
LTP010	MTP033	STP121	VSTP0236	09/08/2016 23:25	12/08/2016 06:39
			VSTP0237	12/08/2016 06:40	15/08/2016 06:39
		STP122	VSTP0238	15/08/2016 06:40	18/08/2016 06:39
			VSTP0239	18/08/2016 06:40	21/08/2016 06:39
		STP123	VSTP0240	21/08/2016 06:40	24/08/2016 06:39
			VSTP0241	24/08/2016 06:40	27/08/2016 06:39
			VSTP0242	27/08/2016 06:40	30/08/2016 06:39
		STP124	VSTP0243	30/08/2016 06:40	02/09/2016 06:39
	MTP034	STP125	VSTP0244	02/09/2016 06:40	05/09/2016 06:39
		STP126	VSTP0245	05/09/2016 06:40	08/09/2016 06:39
			VSTP0246	08/09/2016 06:40	11/09/2016 06:39
		STP127	VSTP0247	11/09/2016 06:40	14/09/2016 06:39
			VSTP0248	14/09/2016 06:40	17/09/2016 06:39
			VSTP0249	17/09/2016 06:40	20/09/2016 06:39
		STP128	VSTP0250	20/09/2016 06:40	23/09/2016 06:39
			VSTP0251	23/09/2016 06:40	26/09/2016 06:39
	MTP035	STP129	VSTP0252	26/09/2016 06:40	27/09/2016 23:59
			VSTP0253	28/09/2016 00:00	29/09/2016 18:29
		STP130	VSTP0254	29/09/2016 18:30	30/09/2016 09:19
			VSTP0255	30/09/2016 09:20	30/09/2016 11:20

Résumé des caractéristiques techniques de VIRTIS

	VIRTIS-M Visible	VIRTIS-M InfraRed	VIRTIS-H
Spectral Range (nm)	220.1–1046.0	952.8–5059.2	*Order* 0 4.05–5.03
			Order 1 3.47–4.32
			Order 2 3.04–3.78
			Order 3 2.70–3.37
			Order 4 2.43–3.03
			Order 5 2.21–2.76
			Order 6 2.03–2.53
			Order 7 1.88–2.33
Spectral Resolution $\lambda/\Delta\lambda\lambda$	100–380	70–360	1300–3000
Spectral Sampling (nm) (1)	1.89	9.44	0.6
Field of View (mrad × mrad)	63.6 (slit) × 64.2 (scan)	63.6 (slit) × 64.2 (scan)	0.49 × 1.47
Max Spatial Resolution (μrad)	248.6 (slit) × 250.8 (scan)		
Pointing	+Zsc and Boresighted with Osiris, NavCam		
Telescope	Shafer Telescope	Shafer Telescope	Off axis parabolic mirror
Pupil Diameter (mm)	47.5		32
Imaging F#	5.6	3.2	2.04
Etendue (m^2 sr)	4.6×10^{-11}	7.5×10^{-11}	$.8\times10^{-9}$
Slit Dimension (mm)	0.038 × 9.53		0.029 × 0.089
Spectrometer	Offner Relay	Offner Relay	Echelle spectrometer
Detectors	Thomson TH7896 CCD	CdHgTe (2)	CdHgTe (2)
Sensitivity Area Format	508 × 1024	270 × 436	270 × 436
Pixel Pitch (μm)	19	38	38
Operating temp. (K)	150 to 190	65 to 90	65 to 90
Spectral range (μm)	0.25 to 1.05	0.95 to 5.0	0.95 to 5.0
Mean Dark Current	<1 e^{-1}/s	<10 fA @ 70K	<10 fA @ 70K
Radiometric Resolution SNR	>100	>100	>100 @ 3.3 μm
Radiometric Accuracy			
Absolute	$<20\%$	$<20\%$	$<20\%$
Relative	$<1\%$	$<1\%$	$<1\%$

TABLE 9.1 – Résumé des caractéristiques techniques de VIRTIS

Sélection de canaux VIRTIS-H

Le tableau qui suit regroupe l'ensemble des canaux de la voie VIRTIS-H. Les canaux surlignés en vert sont ceux retenus pour former un spectre continu, sans chevauchement de longueurs d'onde. Ils ont été sélectionnés en raison de leur qualité relative (moins de bruit en comparaison des autres). Les canaux surlignés en oranges sont des canaux se trouvant dans la gamme sélectionnée dans un des ordres mais présentant une moins bonne fiabilité. Pour plus de détails, voir la sous-section 4.2.4 page 64.

Ces données seront utiles dans l'optique de l'amélioration de la calibration des données de VIRTIS-H réalisée au LESIA. Cette liste de canaux est donc dès à présent disponible sur demande et sera prochainement mis à disposition dans un service dédié sous le nom de fichier « *VIRTIS_H_good_channels_BROUSSEAU* ».

Ordre 0		Ordre 1		Ordre 2		Ordre 3		Ordre 4		Ordre 5		Ordre 6		Ordre 7	
Longueurs d'onde	N°	Longueurs d'onde	N°	Longueurs d'onde	N°	Longueurs d'onde	N°	Longueurs d'onde	N°	Longueurs d'onde	N°	Longueurs d'onde	N°	Longueurs d'onde	N°
5.03180	0	4.32460	432	3.77420	864	3.36840	1296	3.07700	1730	2.75510	2162	2.52580	2594	2.33070	3025
5.03000	1	4.32320	433	3.77310	865	3.36720	1297	3.07550	1731	2.75420	2163	2.52490	2595	2.32990	3026
5.02810	2	4.32170	434	3.77190	866	3.36600	1298	3.07400	1732	2.75320	2164	2.52400	2596	2.32910	3027
5.02630	3	4.32020	435	3.77080	867	3.36480	1299	3.07250	1733	2.75220	2165	2.52310	2597	2.32830	3028
5.02450	4	4.31870	436	3.76960	868	3.36350	1300	3.07100	1734	2.75130	2166	2.52220	2598	2.32750	3029
5.02270	5	4.31720	437	3.76840	869	3.36230	1301	3.06950	1735	2.75030	2167	2.52130	2599	2.32670	3030
5.02090	6	4.31570	438	3.76730	870	3.36110	1302	3.06800	1736	2.74930	2168	2.52040	2600	2.32590	3031
5.01910	7	4.31420	439	3.76610	871	3.35990	1303	3.06660	1737	2.74830	2169	2.51950	2601	2.32510	3032
5.01730	8	4.31270	440	3.76490	872	3.35870	1304	3.06510	1738	2.74730	2170	2.51860	2602	2.32430	3033
5.01550	9	4.31120	441	3.76370	873	3.35750	1305	3.06360	1739	2.74640	2171	2.51760	2603	2.32350	3034
5.01370	10	4.30980	442	3.76250	874	3.35630	1306	3.06210	1740	2.74540	2172	2.51670	2604	2.32270	3035
5.01190	11	4.30830	443	3.76130	875	3.35500	1307	3.06060	1741	2.74440	2173	2.51580	2605	2.32190	3036
5.01010	12	4.30670	444	3.76020	876	3.35380	1308	3.05910	1742	2.74340	2174	2.51490	2606	2.32110	3037
5.00820	13	4.30520	445	3.75900	877	3.35260	1309	3.05770	1743	2.74240	2175	2.51400	2607	2.32030	3038
5.00640	14	4.30370	446	3.75780	878	3.35140	1310	3.05620	1744	2.74140	2176	2.51310	2608	2.31950	3039
5.00460	15	4.30220	447	3.75650	879	3.35020	1311	3.05470	1745	2.74050	2177	2.51210	2609	2.31870	3040
5.00280	16	4.30070	448	3.75530	880	3.34890	1312	3.05320	1746	2.73950	2178	2.51120	2610	2.31790	3041
5.00100	17	4.29920	449	3.75410	881	3.34770	1313	3.05180	1747	2.73850	2179	2.51030	2611	2.31700	3042
4.99910	18	4.29770	450	3.75290	882	3.34650	1314	3.05030	1748	2.73750	2180	2.50940	2612	2.31620	3043
4.99730	19	4.29620	451	3.75170	883	3.34530	1315	3.04880	1749	2.73650	2181	2.50850	2613	2.31540	3044
4.99550	20	4.29470	452	3.75050	884	3.34400	1316	3.04740	1750	2.73550	2182	2.50750	2614	2.31460	3045
4.99370	21	4.29310	453	3.74920	885	3.34280	1317	3.04590	1751	2.73450	2183	2.50660	2615	2.31380	3046
4.99180	22	4.29160	454	3.74800	886	3.34160	1318	3.04440	1752	2.73350	2184	2.50570	2616	2.31290	3047
4.99000	23	4.29010	455	3.74680	887	3.34030	1319	3.04300	1753	2.73250	2185	2.50480	2617	2.31210	3048
4.98820	24	4.28860	456	3.74550	888	3.33910	1320	3.04150	1754	2.73150	2186	2.50380	2618	2.31130	3049
4.98630	25	4.28700	457	3.74430	889	3.33790	1321	3.04000	1755	2.73050	2187	2.50290	2619	2.31050	3050
4.98450	26	4.28550	458	3.74310	890	3.33660	1322	3.03860	1756	2.72950	2188	2.50200	2620	2.30970	3051
4.98270	27	4.28400	459	3.74180	891	3.33540	1323	3.03710	1757	2.72850	2189	2.50100	2621	2.30880	3052
4.98080	28	4.28240	460	3.74060	892	3.33420	1324	3.03560	1758	2.72750	2190	2.50010	2622	2.30800	3053
4.97900	29	4.28090	461	3.73930	893	3.33290	1325	3.03420	1759	2.72650	2191	2.49920	2623	2.30720	3054
4.97720	30	4.27930	462	3.73810	894	3.33170	1326	3.03270	1760	2.72550	2192	2.49830	2624	2.30630	3055
4.97530	31	4.27780	463	3.73680	895	3.33040	1327	3.03130	1761	2.72450	2193	2.49730	2625	2.30550	3056

4.97350	32	4.27630	464	3.73550	896	3.32920	1328	3.02980	1762	2.72350	2194	2.49640	2626	2.30470	3057
4.97160	33	4.27470	465	3.73430	897	3.32800	1329	3.02840	1763	2.72250	2195	2.49550	2627	2.30380	3058
4.96980	34	4.27320	466	3.73300	898	3.32670	1330	3.02690	1764	2.72150	2196	2.49450	2628	2.30300	3059
4.96790	35	4.27160	467	3.73170	899	3.32550	1331	3.02550	1765	2.72050	2197	2.49360	2629	2.30220	3060
4.96610	36	4.27000	468	3.73040	900	3.32420	1332	3.02400	1766	2.71950	2198	2.49260	2630	2.30130	3061
4.96420	37	4.26850	469	3.72920	901	3.32300	1333	3.02260	1767	2.71850	2199	2.49170	2631	2.30050	3062
4.96240	38	4.26690	470	3.72790	902	3.32170	1334	3.02110	1768	2.71740	2200	2.49080	2632	2.29960	3063
4.96050	39	4.26540	471	3.72660	903	3.32050	1335	3.01970	1769	2.71640	2201	2.48980	2633	2.29880	3064
4.95870	40	4.26380	472	3.72530	904	3.31920	1336	3.01820	1770	2.71540	2202	2.48890	2634	2.29800	3065
4.95680	41	4.26220	473	3.72400	905	3.31800	1337	3.01680	1771	2.71440	2203	2.48800	2635	2.29710	3066
4.95500	42	4.26070	474	3.72270	906	3.31670	1338	3.01530	1772	2.71340	2204	2.48700	2636	2.29630	3067
4.95310	43	4.25910	475	3.72140	907	3.31550	1339	3.01390	1773	2.71240	2205	2.48610	2637	2.29540	3068
4.95130	44	4.25750	476	3.72010	908	3.31420	1340	3.01240	1774	2.71130	2206	2.48510	2638	2.29460	3069
4.94940	45	4.25600	477	3.71880	909	3.31300	1341	3.01100	1775	2.71030	2207	2.48420	2639	2.29370	3070
4.94750	46	4.25440	478	3.71750	910	3.31170	1342	3.00950	1776	2.70930	2208	2.48320	2640	2.29290	3071
4.94570	47	4.25280	479	3.71620	911	3.31040	1343	3.00810	1777	2.70830	2209	2.48230	2641	2.29200	3072
4.94380	48	4.25120	480	3.71490	912	3.30920	1344	3.00670	1778	2.70730	2210	2.48130	2642	2.29120	3073
4.94190	49	4.24970	481	3.71360	913	3.30790	1345	3.00520	1779	2.70620	2211	2.48040	2643	2.29030	3074
4.94010	50	4.24810	482	3.71230	914	3.30670	1346	3.00380	1780	2.70520	2212	2.47950	2644	2.28950	3075
4.93820	51	4.24650	483	3.71090	915	3.30540	1347	3.00240	1781	2.70420	2213	2.47850	2645	2.28860	3076
4.93630	52	4.24490	484	3.70960	916	3.30410	1348	3.00090	1782	2.70310	2214	2.47760	2646	2.28770	3077
4.93450	53	4.24330	485	3.70830	917	3.30290	1349	2.99950	1783	2.70210	2215	2.47660	2647	2.28690	3078
4.93260	54	4.24170	486	3.70700	918	3.30160	1350	2.99810	1784	2.70110	2216	2.47570	2648	2.28600	3079
4.93070	55	4.24010	487	3.70560	919	3.30030	1351	2.99660	1785	2.70010	2217	2.47470	2649	2.28520	3080
4.92880	56	4.23850	488	3.70430	920	3.29910	1352	2.99520	1786	2.69900	2218	2.47370	2650	2.28430	3081
4.92690	57	4.23690	489	3.70300	921	3.29780	1353	2.99380	1787	2.69800	2219	2.47280	2651	2.28340	3082
4.92510	58	4.23530	490	3.70160	922	3.29650	1354	2.99230	1788	2.69700	2220	2.47180	2652	2.28260	3083
4.92320	59	4.23370	491	3.70030	923	3.29530	1355	2.99090	1789	2.69590	2221	2.47090	2653	2.28170	3084
4.92130	60	4.23210	492	3.69890	924	3.29400	1356	2.98950	1790	2.69490	2222	2.46990	2654	2.28080	3085
4.91940	61	4.23050	493	3.69760	925	3.29270	1357	2.98800	1791	2.69380	2223	2.46900	2655	2.28000	3086
4.91750	62	4.22890	494	3.69620	926	3.29140	1358	2.98660	1792	2.69280	2224	2.46800	2656	2.27910	3087
4.91560	63	4.22730	495	3.69490	927	3.29020	1359	2.98520	1793	2.69180	2225	2.46700	2657	2.27820	3088
4.91370	64	4.22570	496	3.69350	928	3.28890	1360	2.98380	1794	2.69070	2226	2.46610	2658	2.27740	3089
4.91190	65	4.22410	497	3.69220	929	3.28760	1361	2.98230	1795	2.68970	2227	2.46510	2659	2.27650	3090

4.91000	66	4.22240	498	3.69080	930	3.28630	1362	2.98090	1796	2.68860	2228	2.46420	2660	2.27560	3091
4.90810	67	4.22080	499	3.68950	931	3.28500	1363	2.97950	1797	2.68760	2229	2.46320	2661	2.27470	3092
4.90620	68	4.21920	500	3.68810	932	3.28370	1364	2.97810	1798	2.68650	2230	2.46220	2662	2.27390	3093
4.90430	69	4.21760	501	3.68670	933	3.28250	1365	2.97670	1799	2.68550	2231	2.46130	2663	2.27300	3094
4.90240	70	4.21590	502	3.68530	934	3.28120	1366	2.97520	1800	2.68440	2232	2.46030	2664	2.27210	3095
4.90050	71	4.21430	503	3.68400	935	3.27990	1367	2.97380	1801	2.68340	2233	2.45930	2665	2.27120	3096
4.89860	72	4.21270	504	3.68260	936	3.27860	1368	2.97240	1802	2.68230	2234	2.45840	2666	2.27030	3097
4.89670	73	4.21100	505	3.68120	937	3.27730	1369	2.97100	1803	2.68130	2235	2.45740	2667	2.26950	3098
4.89470	74	4.20940	506	3.67980	938	3.27600	1370	2.96960	1804	2.68020	2236	2.45640	2668	2.26860	3099
4.89280	75	4.20780	507	3.67850	939	3.27470	1371	2.96810	1805	2.67920	2237	2.45550	2669	2.26770	3100
4.89090	76	4.20610	508	3.67710	940	3.27340	1372	2.96670	1806	2.67810	2238	2.45450	2670	2.26680	3101
4.88900	77	4.20450	509	3.67570	941	3.27210	1373	2.96530	1807	2.67700	2239	2.45350	2671	2.26590	3102
4.88710	78	4.20280	510	3.67430	942	3.27080	1374	2.96390	1808	2.67600	2240	2.45250	2672	2.26500	3103
4.88520	79	4.20120	511	3.67290	943	3.26950	1375	2.96250	1809	2.67490	2241	2.45160	2673	2.26410	3104
4.88330	80	4.19950	512	3.67150	944	3.26820	1376	2.96110	1810	2.67390	2242	2.45060	2674	2.26320	3105
4.88130	81	4.19790	513	3.67010	945	3.26690	1377	2.95970	1811	2.67280	2243	2.44960	2675	2.26230	3106
4.87940	82	4.19620	514	3.66870	946	3.26560	1378	2.95820	1812	2.67170	2244	2.44860	2676	2.26140	3107
4.87750	83	4.19460	515	3.66730	947	3.26430	1379	2.95680	1813	2.67070	2245	2.44760	2677	2.26050	3108
4.87560	84	4.19290	516	3.66590	948	3.26300	1380	2.95540	1814	2.66960	2246	2.44670	2678	2.25970	3109
4.87360	85	4.19130	517	3.66450	949	3.26170	1381	2.95400	1815	2.66850	2247	2.44570	2679	2.25880	3110
4.87170	86	4.18960	518	3.66310	950	3.26040	1382	2.95260	1816	2.66750	2248	2.44470	2680	2.25790	3111
4.86980	87	4.18790	519	3.66170	951	3.25910	1383	2.95120	1817	2.66640	2249	2.44370	2681	2.25700	3112
4.86790	88	4.18630	520	3.66020	952	3.25780	1384	2.94980	1818	2.66530	2250	2.44270	2682	2.25610	3113
4.86590	89	4.18460	521	3.65880	953	3.25650	1385	2.94840	1819	2.66420	2251	2.44180	2683	2.25510	3114
4.86400	90	4.18290	522	3.65740	954	3.25520	1386	2.94700	1820	2.66320	2252	2.44080	2684	2.25420	3115
4.86200	91	4.18130	523	3.65600	955	3.25390	1387	2.94560	1821	2.66210	2253	2.43980	2685	2.25330	3116
4.86010	92	4.17960	524	3.65460	956	3.25250	1388	2.94410	1822	2.66100	2254	2.43880	2686	2.25240	3117
4.85820	93	4.17790	525	3.65310	957	3.25120	1389	2.94270	1823	2.65990	2255	2.43780	2687	2.25150	3118
4.85620	94	4.17620	526	3.65170	958	3.24990	1390	2.94130	1824	2.65890	2256	2.43680	2688	2.25060	3119
4.85430	95	4.17450	527	3.65030	959	3.24860	1391	2.93990	1825	2.65780	2257	2.43580	2689	2.24970	3120
4.85230	96	4.17290	528	3.64880	960	3.24730	1392	2.93850	1826	2.65670	2258	2.43480	2690	2.24880	3121
4.85040	97	4.17120	529	3.64740	961	3.24590	1393	2.93710	1827	2.65560	2259	2.43380	2691	2.24790	3122
4.84840	98	4.16950	530	3.64600	962	3.24460	1394	2.93570	1828	2.65450	2260	2.43280	2692	2.24700	3123
4.84650	99	4.16780	531	3.64450	963	3.24330	1395	2.93430	1829	2.65340	2261	2.43180	2693	2.24600	3124

4.84450	100	4.16610	532	3.64310	964	3.24200	1396	2.93290	1830	2.65240	2262	2.43080	2694	2.24510	3125
4.84260	101	4.16440	533	3.64160	965	3.24060	1397	2.93150	1831	2.65130	2263	2.42980	2695	2.24420	3126
4.84060	102	4.16270	534	3.64020	966	3.23930	1398	2.93010	1832	2.65020	2264	2.42890	2696	2.24330	3127
4.83860	103	4.16100	535	3.63870	967	3.23800	1399	2.92870	1833	2.64910	2265	2.42790	2697	2.24240	3128
4.83670	104	4.15930	536	3.63730	968	3.23660	1400	2.92730	1834	2.64800	2266	2.42690	2698	2.24150	3129
4.83470	105	4.15760	537	3.63580	969	3.23530	1401	2.92590	1835	2.64690	2267	2.42580	2699	2.24050	3130
4.83270	106	4.15590	538	3.63440	970	3.23400	1402	2.92450	1836	2.64580	2268	2.42480	2700	2.23960	3131
4.83080	107	4.15420	539	3.63290	971	3.23260	1403	2.92310	1837	2.64470	2269	2.42380	2701	2.23870	3132
4.82880	108	4.15250	540	3.63140	972	3.23130	1404	2.92170	1838	2.64360	2270	2.42280	2702	2.23780	3133
4.82680	109	4.15080	541	3.63000	973	3.23000	1405	2.92030	1839	2.64250	2271	2.42180	2703	2.23680	3134
4.82490	110	4.14900	542	3.62850	974	3.22860	1406	2.91890	1840	2.64140	2272	2.42080	2704	2.23590	3135
4.82290	111	4.14730	543	3.62700	975	3.22730	1407	2.91750	1841	2.64030	2273	2.41980	2705	2.23500	3136
4.82090	112	4.14560	544	3.62560	976	3.22590	1408	2.91610	1842	2.63920	2274	2.41880	2706	2.23400	3137
4.81890	113	4.14390	545	3.62410	977	3.22460	1409	2.91470	1843	2.63810	2275	2.41780	2707	2.23310	3138
4.81690	114	4.14220	546	3.62260	978	3.22330	1410	2.91330	1844	2.63700	2276	2.41680	2708	2.23220	3139
4.81500	115	4.14040	547	3.62120	979	3.22190	1411	2.91190	1845	2.63590	2277	2.41580	2709	2.23120	3140
4.81300	116	4.13870	548	3.61970	980	3.22060	1412	2.91050	1846	2.63480	2278	2.41480	2710	2.23030	3141
4.81100	117	4.13700	549	3.61820	981	3.21920	1413	2.90910	1847	2.63370	2279	2.41370	2711	2.22940	3142
4.80900	118	4.13520	550	3.61670	982	3.21790	1414	2.90770	1848	2.63260	2280	2.41270	2712	2.22840	3143
4.80700	119	4.13350	551	3.61520	983	3.21650	1415	2.90630	1849	2.63150	2281	2.41170	2713	2.22750	3144
4.80500	120	4.13180	552	3.61370	984	3.21510	1416	2.90490	1850	2.63030	2282	2.41070	2714	2.22650	3145
4.80300	121	4.13000	553	3.61230	985	3.21380	1417	2.90350	1851	2.62920	2283	2.40970	2715	2.22560	3146
4.80100	122	4.12830	554	3.61080	986	3.21240	1418	2.90210	1852	2.62810	2284	2.40870	2716	2.22460	3147
4.79900	123	4.12650	555	3.60930	987	3.21110	1419	2.90070	1853	2.62700	2285	2.40760	2717	2.22370	3148
4.79700	124	4.12480	556	3.60780	988	3.20970	1420	2.89930	1854	2.62590	2286	2.40660	2718	2.22280	3149
4.79500	125	4.12300	557	3.60630	989	3.20830	1421	2.89790	1855	2.62480	2287	2.40560	2719	2.22180	3150
4.79300	126	4.12130	558	3.60480	990	3.20700	1422	2.89650	1856	2.62360	2288	2.40460	2720	2.22090	3151
4.79100	127	4.11950	559	3.60330	991	3.20560	1423	2.89520	1857	2.62250	2289	2.40350	2721	2.21990	3152
4.78900	128	4.11780	560	3.60180	992	3.20430	1424	2.89380	1858	2.62140	2290	2.40250	2722	2.21900	3153
4.78700	129	4.11600	561	3.60030	993	3.20290	1425	2.89240	1859	2.62030	2291	2.40150	2723	2.21800	3154
4.78500	130	4.11430	562	3.59880	994	3.20150	1426	2.89100	1860	2.61910	2292	2.40050	2724	2.21710	3155
4.78290	131	4.11250	563	3.59720	995	3.20010	1427	2.88960	1861	2.61800	2293	2.39940	2725	2.21610	3156
4.78090	132	4.11070	564	3.59570	996	3.19880	1428	2.88820	1862	2.61690	2294	2.39840	2726	2.21510	3157
4.77890	133	4.10900	565	3.59420	997	3.19740	1429	2.88680	1863	2.61580	2295	2.39740	2727	2.21420	3158

4.77690	134	4.10720	566	3.59270	998	3.19600	1430	2.88540	1864	2.61460	2296	2.39630	2728	2.21320	3159
4.77480	135	4.10540	567	3.59120	999	3.19460	1431	2.88400	1865	2.61350	2297	2.39530	2729	2.21230	3160
4.77280	136	4.10370	568	3.58970	1000	3.19330	1432	2.88260	1866	2.61240	2298	2.39430	2730	2.21130	3161
4.77080	137	4.10190	569	3.58810	1001	3.19190	1433	2.88120	1867	2.61120	2299	2.39320	2731	2.21030	3162
4.76880	138	4.10010	570	3.58660	1002	3.19050	1434	2.87980	1868	2.61010	2300	2.39220	2732	2.20940	3163
4.76670	139	4.09830	571	3.58510	1003	3.18910	1435	2.87840	1869	2.60900	2301	2.39110	2733	2.20840	3164
4.76470	140	4.09650	572	3.58360	1004	3.18770	1436	2.87700	1870	2.60780	2302	2.39010	2734	2.20740	3165
4.76260	141	4.09480	573	3.58200	1005	3.18630	1437	2.87560	1871	2.60670	2303	2.38910	2735	2.20650	3166
4.76060	142	4.09300	574	3.58050	1006	3.18500	1438	2.87420	1872	2.60550	2304	2.38800	2736	2.20550	3167
4.75860	143	4.09120	575	3.57900	1007	3.18360	1439	2.87280	1873	2.60440	2305	2.38700	2737	2.20450	3168
4.75650	144	4.08940	576	3.57740	1008	3.18220	1440	2.87150	1874	2.60320	2306	2.38590	2738	2.20360	3169
4.75450	145	4.08760	577	3.57590	1009	3.18080	1441	2.87010	1875	2.60210	2307	2.38490	2739	2.20260	3170
4.75240	146	4.08580	578	3.57430	1010	3.17940	1442	2.86870	1876	2.60090	2308	2.38380	2740	2.20160	3171
4.75040	147	4.08400	579	3.57280	1011	3.17800	1443	2.86730	1877	2.59980	2309	2.38280	2741	2.20060	3172
4.74830	148	4.08220	580	3.57120	1012	3.17660	1444	2.86590	1878	2.59870	2310	2.38170	2742	2.19970	3173
4.74620	149	4.08040	581	3.56970	1013	3.17520	1445	2.86450	1879	2.59750	2311	2.38070	2743	2.19870	3174
4.74420	150	4.07860	582	3.56810	1014	3.17380	1446	2.86310	1880	2.59630	2312	2.37960	2744	2.19770	3175
4.74210	151	4.07680	583	3.56660	1015	3.17240	1447	2.86170	1881	2.59520	2313	2.37860	2745	2.19670	3176
4.74010	152	4.07500	584	3.56500	1016	3.17100	1448	2.86030	1882	2.59400	2314	2.37750	2746	2.19570	3177
4.73800	153	4.07320	585	3.56350	1017	3.16960	1449	2.85890	1883	2.59290	2315	2.37650	2747	2.19480	3178
4.73590	154	4.07130	586	3.56190	1018	3.16820	1450	2.85750	1884	2.59170	2316	2.37540	2748	2.19380	3179
4.73390	155	4.06950	587	3.56040	1019	3.16680	1451	2.85610	1885	2.59060	2317	2.37430	2749	2.19280	3180
4.73180	156	4.06770	588	3.55880	1020	3.16540	1452	2.85470	1886	2.58940	2318	2.37330	2750	2.19180	3181
4.72970	157	4.06590	589	3.55720	1021	3.16390	1453	2.85330	1887	2.58820	2319	2.37220	2751	2.19080	3182
4.72760	158	4.06410	590	3.55570	1022	3.16250	1454	2.85190	1888	2.58710	2320	2.37120	2752	2.18980	3183
4.72560	159	4.06220	591	3.55410	1023	3.16110	1455	2.85050	1889	2.58590	2321	2.37010	2753	2.18880	3184
4.72350	160	4.06040	592	3.55250	1024	3.15970	1456	2.84910	1890	2.58470	2322	2.36900	2754	2.18780	3185
4.72140	161	4.05860	593	3.55090	1025	3.15830	1457	2.84780	1891	2.58360	2323	2.36800	2755	2.18680	3186
4.71930	162	4.05670	594	3.54940	1026	3.15690	1458	2.84640	1892	2.58240	2324	2.36690	2756	2.18590	3187
4.71720	163	4.05490	595	3.54780	1027	3.15540	1459	2.84500	1893	2.58120	2325	2.36580	2757	2.18490	3188
4.71510	164	4.05310	596	3.54620	1028	3.15400	1460	2.84360	1894	2.58010	2326	2.36480	2758	2.18390	3189
4.71300	165	4.05120	597	3.54460	1029	3.15260	1461	2.84220	1895	2.57890	2327	2.36370	2759	2.18290	3190
4.71090	166	4.04940	598	3.54310	1030	3.15120	1462	2.84080	1896	2.57770	2328	2.36260	2760	2.18190	3191
4.70880	167	4.04750	599	3.54150	1031	3.14970	1463	2.83940	1897	2.57650	2329	2.36150	2761	2.18090	3192

4.70670	168	4.04570	600	3.53990	1032	3.14830	1464	2.83800	1898	2.57540	2330	2.36050	2762	2.17990	3193
4.70460	169	4.04380	601	3.53830	1033	3.14690	1465	2.83660	1899	2.57420	2331	2.35940	2763	2.17890	3194
4.70250	170	4.04200	602	3.53670	1034	3.14540	1466	2.83520	1900	2.57300	2332	2.35830	2764	2.17790	3195
4.70040	171	4.04010	603	3.53510	1035	3.14400	1467	2.83380	1901	2.57180	2333	2.35720	2765	2.17680	3196
4.69830	172	4.03830	604	3.53350	1036	3.14260	1468	2.83240	1902	2.57060	2334	2.35620	2766	2.17580	3197
4.69620	173	4.03640	605	3.53190	1037	3.14110	1469	2.83100	1903	2.56940	2335	2.35510	2767	2.17480	3198
4.69410	174	4.03460	606	3.53030	1038	3.13970	1470	2.82960	1904	2.56830	2336	2.35400	2768	2.17380	3199
4.69200	175	4.03270	607	3.52870	1039	3.13830	1471	2.82820	1905	2.56710	2337	2.35290	2769	2.17280	3200
4.68980	176	4.03080	608	3.52710	1040	3.13680	1472	2.82680	1906	2.56590	2338	2.35180	2770	2.17180	3201
4.68770	177	4.02900	609	3.52550	1041	3.13540	1473	2.82540	1907	2.56470	2339	2.35070	2771	2.17080	3202
4.68560	178	4.02710	610	3.52390	1042	3.13390	1474	2.82400	1908	2.56350	2340	2.34960	2772	2.16980	3203
4.68350	179	4.02520	611	3.52230	1043	3.13250	1475	2.82260	1909	2.56230	2341	2.34860	2773	2.16880	3204
4.68130	180	4.02340	612	3.52070	1044	3.13100	1476	2.82120	1910	2.56110	2342	2.34750	2774	2.16770	3205
4.67920	181	4.02150	613	3.51900	1045	3.12960	1477	2.81980	1911	2.55990	2343	2.34640	2775	2.16670	3206
4.67710	182	4.01960	614	3.51740	1046	3.12810	1478	2.81840	1912	2.55870	2344	2.34530	2776	2.16570	3207
4.67490	183	4.01770	615	3.51580	1047	3.12670	1479	2.81700	1913	2.55750	2345	2.34420	2777	2.16470	3208
4.67280	184	4.01580	616	3.51420	1048	3.12520	1480	2.81560	1914	2.55630	2346	2.34310	2778	2.16370	3209
4.67060	185	4.01390	617	3.51260	1049	3.12370	1481	2.81420	1915	2.55510	2347	2.34200	2779	2.16260	3210
4.66850	186	4.01210	618	3.51090	1050	3.12230	1482	2.81280	1916	2.55390	2348	2.34090	2780	2.16160	3211
4.66630	187	4.01020	619	3.50930	1051	3.12080	1483	2.81140	1917	2.55270	2349	2.33980	2781	2.16060	3212
4.66420	188	4.00830	620	3.50770	1052	3.11940	1484	2.81000	1918	2.55150	2350	2.33870	2782	2.15960	3213
4.66200	189	4.00640	621	3.50600	1053	3.11790	1485	2.80860	1919	2.55030	2351	2.33760	2783	2.15850	3214
4.65990	190	4.00450	622	3.50440	1054	3.11640	1486	2.80720	1920	2.54910	2352	2.33650	2784	2.15750	3215
4.65770	191	4.00260	623	3.50280	1055	3.11500	1487	2.80580	1921	2.54790	2353	2.33540	2785	2.15650	3216
4.65560	192	4.00070	624	3.50110	1056	3.11350	1488	2.80440	1922	2.54670	2354	2.33430	2786	2.15540	3217
4.65340	193	3.99880	625	3.49950	1057	3.11200	1489	2.80300	1923	2.54550	2355	2.33320	2787	2.15440	3218
4.65120	194	3.99690	626	3.49780	1058	3.11050	1490	2.80160	1924	2.54420	2356	2.33210	2788	2.15340	3219
4.64910	195	3.99500	627	3.49620	1059	3.10910	1491	2.80010	1925	2.54300	2357	2.33100	2789	2.15230	3220
4.64690	196	3.99300	628	3.49460	1060	3.10760	1492	2.79870	1926	2.54180	2358	2.32980	2790	2.15130	3221
4.64470	197	3.99110	629	3.49290	1061	3.10610	1493	2.79730	1927	2.54060	2359	2.32870	2791	2.15020	3222
4.64250	198	3.98920	630	3.49120	1062	3.10460	1494	2.79590	1928	2.53940	2360	2.32760	2792	2.14920	3223
4.64040	199	3.98730	631	3.48960	1063	3.10310	1495	2.79450	1929	2.53810	2361	2.32650	2793	2.14820	3224
4.63820	200	3.98540	632	3.48790	1064	3.10170	1496	2.79310	1930	2.53690	2362	2.32540	2794	2.14710	3225
4.63600	201	3.98350	633	3.48630	1065	3.10020	1497	2.79170	1931	2.53570	2363	2.32430	2795	2.14610	3226

4.63380	202	3.98150	634	3.48460	1066	3.09870	1498	2.79030	1932	2.53450	2364	2.32320	2796	2.14500	3227
4.63160	203	3.97960	635	3.48300	1067	3.09720	1499	2.78890	1933	2.53320	2365	2.32200	2797	2.14400	3228
4.62940	204	3.97770	636	3.48130	1068	3.09570	1500	2.78750	1934	2.53200	2366	2.32090	2798	2.14290	3229
4.62720	205	3.97570	637	3.47960	1069	3.09420	1501	2.78600	1935	2.53080	2367	2.31980	2799	2.14190	3230
4.62500	206	3.97380	638	3.47800	1070	3.09270	1502	2.78460	1936	2.52950	2368	2.31870	2800	2.14080	3231
4.62280	207	3.97190	639	3.47630	1071	3.09120	1503	2.78320	1937	2.52830	2369	2.31750	2801	2.13980	3232
4.62060	208	3.96990	640	3.47460	1072	3.08970	1504	2.78180	1938	2.52710	2370	2.31640	2802	2.13870	3233
4.61840	209	3.96800	641	3.47290	1073	3.08820	1505	2.78040	1939	2.52580	2371	2.31530	2803	2.13770	3234
4.61620	210	3.96600	642	3.47130	1074	3.08670	1506	2.77900	1940	2.52460	2372	2.31410	2804	2.13660	3235
4.61400	211	3.96410	643	3.46960	1075	3.08520	1507	2.77760	1941	2.52340	2373	2.31300	2805	2.13560	3236
4.61180	212	3.96220	644	3.46790	1076	3.08370	1508	2.77610	1942	2.52210	2374	2.31190	2806	2.13450	3237
4.60960	213	3.96020	645	3.46620	1077	3.08220	1509	2.77470	1943	2.52090	2375	2.31070	2807	2.13350	3238
4.60740	214	3.95820	646	3.46450	1078	3.08070	1510	2.77330	1944	2.51960	2376	2.30960	2808	2.13240	3239
4.60510	215	3.95630	647	3.46280	1079	3.07920	1511	2.77190	1945	2.51840	2377	2.30850	2809	2.13130	3240
4.60290	216	3.95430	648	3.46110	1080	3.07770	1512	2.77050	1946	2.51710	2378	2.30730	2810	2.13030	3241
4.60070	217	3.95240	649	3.45940	1081	3.07610	1513	2.76900	1947	2.51590	2379	2.30620	2811	2.12920	3242
4.59850	218	3.95040	650	3.45780	1082	3.07460	1514	2.76760	1948	2.51460	2380	2.30500	2812	2.12810	3243
4.59620	219	3.94840	651	3.45610	1083	3.07310	1515	2.76620	1949	2.51340	2381	2.30390	2813	2.12710	3244
4.59400	220	3.94650	652	3.45440	1084	3.07160	1516	2.76480	1950	2.51210	2382	2.30280	2814	2.12600	3245
4.59180	221	3.94450	653	3.45270	1085	3.07010	1517	2.76340	1951	2.51090	2383	2.30160	2815	2.12490	3246
4.58950	222	3.94250	654	3.45090	1086	3.06850	1518	2.76190	1952	2.50960	2384	2.30050	2816	2.12390	3247
4.58730	223	3.94060	655	3.44920	1087	3.06700	1519	2.76050	1953	2.50840	2385	2.29930	2817	2.12280	3248
4.58500	224	3.93860	656	3.44750	1088	3.06550	1520	2.75910	1954	2.50710	2386	2.29820	2818	2.12170	3249
4.58280	225	3.93660	657	3.44580	1089	3.06400	1521	2.75770	1955	2.50580	2387	2.29700	2819	2.12060	3250
4.58050	226	3.93460	658	3.44410	1090	3.06240	1522	2.75620	1956	2.50460	2388	2.29590	2820	2.11960	3251
4.57830	227	3.93260	659	3.44240	1091	3.06090	1523	2.75480	1957	2.50330	2389	2.29470	2821	2.11850	3252
4.57600	228	3.93070	660	3.44070	1092	3.05940	1524	2.75340	1958	2.50210	2390	2.29360	2822	2.11740	3253
4.57380	229	3.92870	661	3.43900	1093	3.05780	1525	2.75190	1959	2.50080	2391	2.29240	2823	2.11630	3254
4.57150	230	3.92670	662	3.43720	1094	3.05630	1526	2.75050	1960	2.49950	2392	2.29120	2824	2.11520	3255
4.56920	231	3.92470	663	3.43550	1095	3.05470	1527	2.74910	1961	2.49820	2393	2.29010	2825	2.11420	3256
4.56700	232	3.92270	664	3.43380	1096	3.05320	1528	2.74760	1962	2.49700	2394	2.28890	2826	2.11310	3257
4.56470	233	3.92070	665	3.43200	1097	3.05160	1529	2.74620	1963	2.49570	2395	2.28770	2827	2.11200	3258
4.56240	234	3.91870	666	3.43030	1098	3.05010	1530	2.74480	1964	2.49440	2396	2.28660	2828	2.11090	3259
4.56010	235	3.91670	667	3.42860	1099	3.04850	1531	2.74330	1965	2.49320	2397	2.28540	2829	2.10980	3260

4.55790	236	3.91470	668	3.42680	1100	3.04700	1532	2.74190	1966	2.49190	2398	2.28420	2830	2.10870	3261
4.55560	237	3.91270	669	3.42510	1101	3.04540	1533	2.74050	1967	2.49060	2399	2.28310	2831	2.10760	3262
4.55330	238	3.91070	670	3.42340	1102	3.04390	1534	2.73900	1968	2.48930	2400	2.28190	2832	2.10660	3263
4.55100	239	3.90860	671	3.42160	1103	3.04230	1535	2.73760	1969	2.48800	2401	2.28070	2833	2.10550	3264
4.54870	240	3.90660	672	3.41990	1104	3.04080	1536	2.73620	1970	2.48670	2402	2.27960	2834	2.10440	3265
4.54640	241	3.90460	673	3.41810	1105	3.03920	1537	2.73470	1971	2.48550	2403	2.27840	2835	2.10330	3266
4.54410	242	3.90260	674	3.41640	1106	3.03760	1538	2.73330	1972	2.48420	2404	2.27720	2836	2.10220	3267
4.54180	243	3.90060	675	3.41460	1107	3.03610	1539	2.73180	1973	2.48290	2405	2.27600	2837	2.10110	3268
4.53950	244	3.89850	676	3.41290	1108	3.03450	1540	2.73040	1974	2.48160	2406	2.27490	2838	2.10000	3269
4.53720	245	3.89650	677	3.41110	1109	3.03290	1541	2.72890	1975	2.48030	2407	2.27370	2839	2.09890	3270
4.53490	246	3.89450	678	3.40940	1110	3.03140	1542	2.72750	1976	2.47900	2408	2.27250	2840	2.09780	3271
4.53260	247	3.89250	679	3.40760	1111	3.02980	1543	2.72610	1977	2.47770	2409	2.27130	2841	2.09670	3272
4.53030	248	3.89040	680	3.40580	1112	3.02820	1544	2.72460	1978	2.47640	2410	2.27010	2842	2.09560	3273
4.52790	249	3.88840	681	3.40410	1113	3.02670	1545	2.72320	1979	2.47510	2411	2.26890	2843	2.09450	3274
4.52560	250	3.88630	682	3.40230	1114	3.02510	1546	2.72170	1980	2.47380	2412	2.26770	2844	2.09330	3275
4.52330	251	3.88430	683	3.40050	1115	3.02350	1547	2.72030	1981	2.47250	2413	2.26660	2845	2.09220	3276
4.52100	252	3.88230	684	3.39870	1116	3.02190	1548	2.71880	1982	2.47120	2414	2.26540	2846	2.09110	3277
4.51860	253	3.88020	685	3.39700	1117	3.02030	1549	2.71730	1983	2.46990	2415	2.26420	2847	2.09000	3278
4.51630	254	3.87820	686	3.39520	1118	3.01870	1550	2.71590	1984	2.46860	2416	2.26300	2848	2.08890	3279
4.51400	255	3.87610	687	3.39340	1119	3.01720	1551	2.71440	1985	2.46730	2417	2.26180	2849	2.08780	3280
4.51160	256	3.87410	688	3.39160	1120	3.01560	1552	2.71300	1986	2.46600	2418	2.26060	2850	2.08670	3281
4.50930	257	3.87200	689	3.38980	1121	3.01400	1553	2.71150	1987	2.46470	2419	2.25940	2851	2.08560	3282
4.50690	258	3.87000	690	3.38810	1122	3.01240	1554	2.71010	1988	2.46340	2420	2.25820	2852	2.08440	3283
4.50460	259	3.86790	691	3.38630	1123	3.01080	1555	2.70860	1989	2.46210	2421	2.25700	2853	2.08330	3284
4.50220	260	3.86580	692	3.38450	1124	3.00920	1556	2.70710	1990	2.46070	2422	2.25580	2854	2.08220	3285
4.49990	261	3.86380	693	3.38270	1125	3.00760	1557	2.70570	1991	2.45940	2423	2.25460	2855	2.08110	3286
4.49750	262	3.86170	694	3.38090	1126	3.00600	1558	2.70420	1992	2.45810	2424	2.25340	2856	2.08000	3287
4.49520	263	3.85960	695	3.37910	1127	3.00440	1559	2.70280	1993	2.45680	2425	2.25210	2857	2.07880	3288
4.49280	264	3.85760	696	3.37730	1128	3.00280	1560	2.70130	1994	2.45550	2426	2.25090	2858	2.07770	3289
4.49040	265	3.85550	697	3.37550	1129	3.00120	1561	2.69980	1995	2.45410	2427	2.24970	2859	2.07660	3290
4.48810	266	3.85340	698	3.37370	1130	2.99950	1562	2.69840	1996	2.45280	2428	2.24850	2860	2.07550	3291
4.48570	267	3.85130	699	3.37190	1131	2.99790	1563	2.69690	1997	2.45150	2429	2.24730	2861	2.07430	3292
4.48330	268	3.84920	700	3.37000	1132	2.99630	1564	2.69540	1998	2.45020	2430	2.24610	2862	2.07320	3293
4.48090	269	3.84720	701	3.36820	1133	2.99470	1565	2.69390	1999	2.44880	2431	2.24490	2863	2.07210	3294

4.47850	270	3.84510	702	3.36640	1134	2.99310	1566	2.69250	2000	2.44750	2432	2.24360	2864	2.07090	3295
4.47620	271	3.84300	703	3.36460	1135	2.99150	1567	2.69100	2001	2.44620	2433	2.24240	2865	2.06980	3296
4.47380	272	3.84090	704	3.36280	1136	2.98980	1568	2.68950	2002	2.44480	2434	2.24120	2866	2.06870	3297
4.47140	273	3.83880	705	3.36100	1137	2.98820	1569	2.68800	2003	2.44350	2435	2.24000	2867	2.06750	3298
4.46900	274	3.83670	706	3.35910	1138	2.98660	1570	2.68660	2004	2.44220	2436	2.23870	2868	2.06640	3299
4.46660	275	3.83460	707	3.35730	1139	2.98500	1571	2.68510	2005	2.44080	2437	2.23750	2869	2.06520	3300
4.46420	276	3.83250	708	3.35550	1140	2.98330	1572	2.68360	2006	2.43950	2438	2.23630	2870	2.06410	3301
4.46180	277	3.83040	709	3.35360	1141	2.98170	1573	2.68210	2007	2.43810	2439	2.23510	2871	2.06300	3302
4.45940	278	3.82830	710	3.35180	1142	2.98010	1574	2.68060	2008	2.43680	2440	2.23380	2872	2.06180	3303
4.45700	279	3.82620	711	3.35000	1143	2.97840	1575	2.67920	2009	2.43540	2441	2.23260	2873	2.06070	3304
4.45450	280	3.82410	712	3.34810	1144	2.97680	1576	2.67770	2010	2.43410	2442	2.23140	2874	2.05950	3305
4.45210	281	3.82200	713	3.34630	1145	2.97510	1577	2.67620	2011	2.43270	2443	2.23010	2875	2.05840	3306
4.44970	282	3.81980	714	3.34440	1146	2.97350	1578	2.67470	2012	2.43140	2444	2.22890	2876	2.05720	3307
4.44730	283	3.81770	715	3.34260	1147	2.97190	1579	2.67320	2013	2.43000	2445	2.22760	2877	2.05610	3308
4.44490	284	3.81560	716	3.34070	1148	2.97020	1580	2.67170	2014	2.42870	2446	2.22640	2878	2.05490	3309
4.44240	285	3.81350	717	3.33890	1149	2.96860	1581	2.67020	2015	2.42730	2447	2.22510	2879	2.05380	3310
4.44000	286	3.81140	718	3.33700	1150	2.96690	1582	2.66870	2016	2.42600	2448	2.22390	2880	2.05260	3311
4.43760	287	3.80920	719	3.33520	1151	2.96520	1583	2.66720	2017	2.42460	2449	2.22270	2881	2.05150	3312
4.43510	288	3.80710	720	3.33330	1152	2.96360	1584	2.66570	2018	2.42330	2450	2.22140	2882	2.05030	3313
4.43270	289	3.80500	721	3.33140	1153	2.96190	1585	2.66420	2019	2.42190	2451	2.22020	2883	2.04920	3314
4.43020	290	3.80280	722	3.32960	1154	2.96030	1586	2.66270	2020	2.42050	2452	2.21890	2884	2.04800	3315
4.42780	291	3.80070	723	3.32770	1155	2.95860	1587	2.66120	2021	2.41920	2453	2.21760	2885	2.04680	3316
4.42530	292	3.79860	724	3.32580	1156	2.95690	1588	2.65970	2022	2.41780	2454	2.21640	2886	2.04570	3317
4.42290	293	3.79640	725	3.32400	1157	2.95530	1589	2.65820	2023	2.41640	2455	2.21510	2887	2.04450	3318
4.42040	294	3.79430	726	3.32210	1158	2.95360	1590	2.65670	2024	2.41510	2456	2.21390	2888	2.04330	3319
4.41790	295	3.79210	727	3.32020	1159	2.95190	1591	2.65520	2025	2.41370	2457	2.21260	2889	2.04220	3320
4.41550	296	3.79000	728	3.31830	1160	2.95030	1592	2.65370	2026	2.41230	2458	2.21140	2890	2.04100	3321
4.41300	297	3.78780	729	3.31650	1161	2.94860	1593	2.65220	2027	2.41090	2459	2.21010	2891	2.03980	3322
4.41050	298	3.78570	730	3.31460	1162	2.94690	1594	2.65070	2028	2.40960	2460	2.20880	2892	2.03870	3323
4.40810	299	3.78350	731	3.31270	1163	2.94520	1595	2.64920	2029	2.40820	2461	2.20760	2893	2.03750	3324
4.40560	300	3.78130	732	3.31080	1164	2.94360	1596	2.64770	2030	2.40680	2462	2.20630	2894	2.03630	3325
4.40310	301	3.77920	733	3.30890	1165	2.94190	1597	2.64610	2031	2.40540	2463	2.20500	2895	2.03520	3326
4.40060	302	3.77700	734	3.30700	1166	2.94020	1598	2.64460	2032	2.40400	2464	2.20370	2896	2.03400	3327
4.39810	303	3.77490	735	3.30510	1167	2.93850	1599	2.64310	2033	2.40260	2465	2.20250	2897	2.03280	3328

4.39560	304	3.77270	736	3.30320	1168	2.93680	1600	2.64160	2034	2.40130	2466	2.20120	2898	2.03160	3329
4.39310	305	3.77050	737	3.30130	1169	2.93510	1601	2.64010	2035	2.39990	2467	2.19990	2899	2.03040	3330
4.39060	306	3.76830	738	3.29940	1170	2.93340	1602	2.63850	2036	2.39850	2468	2.19860	2900	2.02930	3331
4.38810	307	3.76620	739	3.29750	1171	2.93170	1603	2.63700	2037	2.39710	2469	2.19740	2901	2.02810	3332
4.38560	308	3.76400	740	3.29560	1172	2.93000	1604	2.63550	2038	2.39570	2470	2.19610	2902	2.02690	3333
4.38310	309	3.76180	741	3.29370	1173	2.92830	1605	2.63400	2039	2.39430	2471	2.19480	2903	2.02570	3334
4.38060	310	3.75960	742	3.29180	1174	2.92660	1606	2.63240	2040	2.39290	2472	2.19350	2904	2.02450	3335
4.37810	311	3.75740	743	3.28990	1175	2.92490	1607	2.63090	2041	2.39150	2473	2.19220	2905	2.02330	3336
4.37560	312	3.75520	744	3.28790	1176	2.92320	1608	2.62940	2042	2.39010	2474	2.19090	2906	2.02220	3337
4.37300	313	3.75300	745	3.28600	1177	2.92150	1609	2.62780	2043	2.38870	2475	2.18960	2907	2.02100	3338
4.37050	314	3.75090	746	3.28410	1178	2.91980	1610	2.62630	2044	2.38730	2476	2.18830	2908	2.01980	3339
4.36800	315	3.74870	747	3.28220	1179	2.91810	1611	2.62470	2045	2.38590	2477	2.18700	2909	2.01860	3340
4.36540	316	3.74650	748	3.28020	1180	2.91630	1612	2.62320	2046	2.38450	2478	2.18580	2910	2.01740	3341
4.36290	317	3.74430	749	3.27830	1181	2.91460	1613	2.62170	2047	2.38310	2479	2.18450	2911	2.01620	3342
4.36040	318	3.74210	750	3.27640	1182	2.91290	1614	2.62010	2048	2.38170	2480	2.18320	2912	2.01500	3343
4.35780	319	3.73980	751	3.27440	1183	2.91120	1615	2.61860	2049	2.38020	2481	2.18190	2913	2.01380	3344
4.35530	320	3.73760	752	3.27250	1184	2.90940	1616	2.61700	2050	2.37880	2482	2.18060	2914	2.01260	3345
4.35270	321	3.73540	753	3.27060	1185	2.90770	1617	2.61550	2051	2.37740	2483	2.17920	2915	2.01140	3346
4.35020	322	3.73320	754	3.26860	1186	2.90600	1618	2.61390	2052	2.37600	2484	2.17790	2916	2.01020	3347
4.34760	323	3.73100	755	3.26670	1187	2.90430	1619	2.61240	2053	2.37460	2485	2.17660	2917	2.00900	3348
4.34500	324	3.72880	756	3.26470	1188	2.90250	1620	2.61080	2054	2.37320	2486	2.17530	2918	2.00780	3349
4.34250	325	3.72660	757	3.26280	1189	2.90080	1621	2.60930	2055	2.37170	2487	2.17400	2919	2.00660	3350
4.33990	326	3.72430	758	3.26080	1190	2.89900	1622	2.60770	2056	2.37030	2488	2.17270	2920	2.00540	3351
4.33730	327	3.72210	759	3.25890	1191	2.89730	1623	2.60610	2057	2.36890	2489	2.17140	2921	2.00420	3352
4.33480	328	3.71990	760	3.25690	1192	2.89560	1624	2.60460	2058	2.36740	2490	2.17010	2922	2.00300	3353
4.33220	329	3.71770	761	3.25490	1193	2.89380	1625	2.60300	2059	2.36600	2491	2.16870	2923	2.00170	3354
4.32960	330	3.71540	762	3.25300	1194	2.89210	1626	2.60140	2060	2.36460	2492	2.16740	2924	2.00050	3355
4.32700	331	3.71320	763	3.25100	1195	2.89030	1627	2.59990	2061	2.36320	2493	2.16610	2925	1.99930	3356
4.32440	332	3.71090	764	3.24900	1196	2.88860	1628	2.59830	2062	2.36170	2494	2.16480	2926	1.99810	3357
4.32180	333	3.70870	765	3.24710	1197	2.88680	1629	2.59670	2063	2.36030	2495	2.16340	2927	1.99690	3358
4.31920	334	3.70650	766	3.24510	1198	2.88500	1630	2.59520	2064	2.35880	2496	2.16210	2928	1.99570	3359
4.31660	335	3.70420	767	3.24310	1199	2.88330	1631	2.59360	2065	2.35740	2497	2.16080	2929	1.99440	3360
4.31400	336	3.70200	768	3.24120	1200	2.88150	1632	2.59200	2066	2.35600	2498	2.15950	2930	1.99320	3361
4.31140	337	3.69970	769	3.23920	1201	2.87980	1633	2.59040	2067	2.35450	2499	2.15810	2931	1.99200	3362

4.30880	338	3.69750	770	3.23720	1202	2.87800	1634	2.58890	2068	2.35310	2500	2.15680	2932	1.99080	3363
4.30620	339	3.69520	771	3.23520	1203	2.87620	1635	2.58730	2069	2.35160	2501	2.15550	2933	1.98960	3364
4.30360	340	3.69300	772	3.23320	1204	2.87440	1636	2.58570	2070	2.35020	2502	2.15410	2934	1.98830	3365
4.30090	341	3.69070	773	3.23120	1205	2.87270	1637	2.58410	2071	2.34870	2503	2.15280	2935	1.98710	3366
4.29830	342	3.68840	774	3.22920	1206	2.87090	1638	2.58250	2072	2.34730	2504	2.15140	2936	1.98590	3367
4.29570	343	3.68620	775	3.22720	1207	2.86910	1639	2.58090	2073	2.34580	2505	2.15010	2937	1.98460	3368
4.29310	344	3.68390	776	3.22530	1208	2.86730	1640	2.57930	2074	2.34440	2506	2.14870	2938	1.98340	3369
4.29040	345	3.68160	777	3.22330	1209	2.86560	1641	2.57770	2075	2.34290	2507	2.14740	2939	1.98220	3370
4.28780	346	3.67930	778	3.22130	1210	2.86380	1642	2.57610	2076	2.34140	2508	2.14600	2940	1.98100	3371
4.28510	347	3.67710	779	3.21930	1211	2.86200	1643	2.57450	2077	2.34000	2509	2.14470	2941	1.97970	3372
4.28250	348	3.67480	780	3.21720	1212	2.86020	1644	2.57290	2078	2.33850	2510	2.14330	2942	1.97850	3373
4.27980	349	3.67250	781	3.21520	1213	2.85840	1645	2.57130	2079	2.33710	2511	2.14200	2943	1.97720	3374
4.27720	350	3.67020	782	3.21320	1214	2.85660	1646	2.56970	2080	2.33560	2512	2.14060	2944	1.97600	3375
4.27450	351	3.66790	783	3.21120	1215	2.85480	1647	2.56810	2081	2.33410	2513	2.13930	2945	1.97480	3376
4.27180	352	3.66570	784	3.20920	1216	2.85300	1648	2.56650	2082	2.33260	2514	2.13790	2946	1.97350	3377
4.26920	353	3.66340	785	3.20720	1217	2.85120	1649	2.56490	2083	2.33120	2515	2.13650	2947	1.97230	3378
4.26650	354	3.66110	786	3.20520	1218	2.84940	1650	2.56330	2084	2.32970	2516	2.13520	2948	1.97100	3379
4.26380	355	3.65880	787	3.20310	1219	2.84760	1651	2.56170	2085	2.32820	2517	2.13380	2949	1.96980	3380
4.26120	356	3.65650	788	3.20110	1220	2.84580	1652	2.56010	2086	2.32670	2518	2.13240	2950	1.96850	3381
4.25850	357	3.65420	789	3.19910	1221	2.84400	1653	2.55840	2087	2.32530	2519	2.13110	2951	1.96730	3382
4.25580	358	3.65190	790	3.19710	1222	2.84210	1654	2.55680	2088	2.32380	2520	2.12970	2952	1.96600	3383
4.25310	359	3.64960	791	3.19500	1223	2.84030	1655	2.55520	2089	2.32230	2521	2.12830	2953	1.96480	3384
4.25040	360	3.64730	792	3.19300	1224	2.83850	1656	2.55360	2090	2.32080	2522	2.12700	2954	1.96350	3385
4.24770	361	3.64500	793	3.19100	1225	2.83670	1657	2.55190	2091	2.31930	2523	2.12560	2955	1.96230	3386
4.24500	362	3.64260	794	3.18890	1226	2.83490	1658	2.55030	2092	2.31780	2524	2.12420	2956	1.96100	3387
4.24230	363	3.64030	795	3.18690	1227	2.83300	1659	2.54870	2093	2.31640	2525	2.12280	2957	1.95980	3388
4.23960	364	3.63800	796	3.18490	1228	2.83120	1660	2.54700	2094	2.31490	2526	2.12140	2958	1.95850	3389
4.23690	365	3.63570	797	3.18280	1229	2.82940	1661	2.54540	2095	2.31340	2527	2.12010	2959	1.95730	3390
4.23420	366	3.63340	798	3.18080	1230	2.82750	1662	2.54380	2096	2.31190	2528	2.11870	2960	1.95600	3391
4.23140	367	3.63100	799	3.17870	1231	2.82570	1663	2.54210	2097	2.31040	2529	2.11730	2961	1.95470	3392
4.22870	368	3.62870	800	3.17670	1232	2.82390	1664	2.54050	2098	2.30890	2530	2.11590	2962	1.95350	3393
4.22600	369	3.62640	801	3.17460	1233	2.82200	1665	2.53880	2099	2.30740	2531	2.11450	2963	1.95220	3394
4.22330	370	3.62400	802	3.17260	1234	2.82020	1666	2.53720	2100	2.30590	2532	2.11310	2964	1.95090	3395
4.22050	371	3.62170	803	3.17050	1235	2.81830	1667	2.53550	2101	2.30440	2533	2.11170	2965	1.94970	3396

4.21780	372	3.61940	804	3.16840	1236	2.81650	1668	2.53390	2102	2.30290	2534	2.11030	2966	1.94840	3397
4.21500	373	3.61700	805	3.16640	1237	2.81460	1669	2.53220	2103	2.30140	2535	2.10890	2967	1.94710	3398
4.21230	374	3.61470	806	3.16430	1238	2.81280	1670	2.53060	2104	2.29980	2536	2.10750	2968	1.94590	3399
4.20950	375	3.61230	807	3.16220	1239	2.81090	1671	2.52890	2105	2.29830	2537	2.10610	2969	1.94460	3400
4.20680	376	3.61000	808	3.16020	1240	2.80910	1672	2.52730	2106	2.29680	2538	2.10470	2970	1.94330	3401
4.20400	377	3.60760	809	3.15810	1241	2.80720	1673	2.52560	2107	2.29530	2539	2.10330	2971	1.94200	3402
4.20130	378	3.60530	810	3.15600	1242	2.80540	1674	2.52390	2108	2.29380	2540	2.10190	2972	1.94080	3403
4.19850	379	3.60290	811	3.15400	1243	2.80350	1675	2.52230	2109	2.29230	2541	2.10050	2973	1.93950	3404
4.19570	380	3.60060	812	3.15190	1244	2.80160	1676	2.52060	2110	2.29070	2542	2.09910	2974	1.93820	3405
4.19300	381	3.59820	813	3.14980	1245	2.79970	1677	2.51890	2111	2.28920	2543	2.09760	2975	1.93690	3406
4.19020	382	3.59580	814	3.14770	1246	2.79790	1678	2.51720	2112	2.28770	2544	2.09620	2976	1.93560	3407
4.18740	383	3.59350	815	3.14560	1247	2.79600	1679	2.51560	2113	2.28620	2545	2.09480	2977	1.93440	3408
4.18460	384	3.59110	816	3.14360	1248	2.79410	1680	2.51390	2114	2.28460	2546	2.09340	2978	1.93310	3409
4.18180	385	3.58870	817	3.14150	1249	2.79220	1681	2.51220	2115	2.28310	2547	2.09200	2979	1.93180	3410
4.17900	386	3.58640	818	3.13940	1250	2.79040	1682	2.51050	2116	2.28160	2548	2.09050	2980	1.93050	3411
4.17620	387	3.58400	819	3.13730	1251	2.78850	1683	2.50880	2117	2.28000	2549	2.08910	2981	1.92920	3412
4.17340	388	3.58160	820	3.13520	1252	2.78660	1684	2.50710	2118	2.27850	2550	2.08770	2982	1.92790	3413
4.17060	389	3.57920	821	3.13310	1253	2.78470	1685	2.50540	2119	2.27700	2551	2.08620	2983	1.92660	3414
4.16780	390	3.57680	822	3.13100	1254	2.78280	1686	2.50380	2120	2.27540	2552	2.08480	2984	1.92530	3415
4.16500	391	3.57450	823	3.12890	1255	2.78090	1687	2.50210	2121	2.27390	2553	2.08340	2985	1.92400	3416
4.16220	392	3.57210	824	3.12680	1256	2.77900	1688	2.50040	2122	2.27240	2554	2.08190	2986	1.92280	3417
4.15940	393	3.56970	825	3.12470	1257	2.77710	1689	2.49870	2123	2.27080	2555	2.08050	2987	1.92150	3418
4.15650	394	3.56730	826	3.12260	1258	2.77520	1690	2.49700	2124	2.26930	2556	2.07910	2988	1.92020	3419
4.15370	395	3.56490	827	3.12050	1259	2.77330	1691	2.49520	2125	2.26770	2557	2.07760	2989	1.91890	3420
4.15090	396	3.56250	828	3.11840	1260	2.77140	1692	2.49350	2126	2.26620	2558	2.07620	2990	1.91760	3421
4.14800	397	3.56010	829	3.11630	1261	2.76950	1693	2.49180	2127	2.26460	2559	2.07470	2991	1.91630	3422
4.14520	398	3.55770	830	3.11420	1262	2.76760	1694	2.49010	2128	2.26310	2560	2.07330	2992	1.91490	3423
4.14230	399	3.55530	831	3.11210	1263	2.76560	1695	2.48840	2129	2.26150	2561	2.07180	2993	1.91360	3424
4.13950	400	3.55290	832	3.11000	1264	2.76370	1696	2.48670	2130	2.25990	2562	2.07040	2994	1.91230	3425
4.13660	401	3.55050	833	3.10780	1265	2.76180	1697	2.48500	2131	2.25840	2563	2.06890	2995	1.91100	3426
4.13380	402	3.54800	834	3.10570	1266	2.75990	1698	2.48320	2132	2.25680	2564	2.06750	2996	1.90970	3427
4.13090	403	3.54560	835	3.10360	1267	2.75800	1699	2.48150	2133	2.25530	2565	2.06600	2997	1.90840	3428
4.12810	404	3.54320	836	3.10150	1268	2.75600	1700	2.47980	2134	2.25370	2566	2.06450	2998	1.90710	3429
4.12520	405	3.54080	837	3.09940	1269	2.75410	1701	2.47800	2135	2.25210	2567	2.06310	2999	1.90580	3430

4.12230	406	3.53840	838	3.09720	1270	2.75220	1702	2.47630	2136	2.25060	2568	2.06160	3000	1.90450	3431
4.11940	407	3.53590	839	3.09510	1271	2.75020	1703	2.47460	2137	2.24900	2569	2.06010	3001	1.90320	3432
4.11650	408	3.53350	840	3.09300	1272	2.74830	1704	2.47280	2138	2.24740	2570	2.05870	3002	1.90180	3433
4.11370	409	3.53110	841	3.09080	1273	2.74630	1705	2.47110	2139	2.24580	2571	2.05720	3003	1.90050	3434
4.11080	410	3.52860	842	3.08870	1274	2.74440	1706	2.46930	2140	2.24430	2572	2.05570	3004	1.89920	3435
4.10790	411	3.52620	843	3.08660	1275	2.74250	1707	2.46760	2141	2.24270	2573	2.05430	3005	1.89790	3436
4.10500	412	3.52370	844	3.08440	1276	2.74050	1708	2.46580	2142	2.24110	2574	2.05280	3006	1.89660	3437
4.10210	413	3.52130	845	3.08230	1277	2.73850	1709	2.46410	2143	2.23950	2575	2.05130	3007	1.89520	3438
4.09920	414	3.51890	846	3.08020	1278	2.73660	1710	2.46230	2144	2.23790	2576	2.04980	3008	1.89390	3439
4.09630	415	3.51640	847	3.07800	1279	2.73460	1711	2.46060	2145	2.23630	2577	2.04830	3009	1.89260	3440
4.09330	416	3.51400	848	3.07590	1280	2.73270	1712	2.45880	2146	2.23480	2578	2.04680	3010	1.89120	3441
4.09040	417	3.51150	849	3.07370	1281	2.73070	1713	2.45700	2147	2.23320	2579	2.04540	3011	1.88990	3442
4.08750	418	3.50910	850	3.07160	1282	2.72880	1714	2.45530	2148	2.23160	2580	2.04390	3012	1.88860	3443
4.08460	419	3.50660	851	3.06940	1283	2.72680	1715	2.45350	2149	2.23000	2581	2.04240	3013	1.88730	3444
4.08160	420	3.50410	852	3.06730	1284	2.72480	1716	2.45170	2150	2.22840	2582	2.04090	3014	1.88590	3445
4.07870	421	3.50170	853	3.06520	1285	2.72280	1717	2.45000	2151	2.22680	2583	2.03940	3015	1.88460	3446
4.07580	422	3.49920	854	3.06300	1286	2.72090	1718	2.44820	2152	2.22520	2584	2.03790	3016	1.88330	3447
4.07280	423	3.49670	855	3.06090	1287	2.71890	1719	2.44640	2153	2.22360	2585	2.03640	3017	1.88190	3448
4.06990	424	3.49430	856	3.05870	1288	2.71690	1720	2.44460	2154	2.22200	2586	2.03490	3018	1.88060	3449
4.06690	425	3.49180	857	3.05650	1289	2.71490	1721	2.44280	2155	2.22040	2587	2.03340	3019	1.87920	3450
4.06390	426	3.48930	858	3.05440	1290	2.71290	1722	2.44110	2156	2.21880	2588	2.03190	3020	1.87790	3451
4.06100	427	3.48680	859	3.05220	1291	2.71090	1723	2.43930	2157	2.21720	2589	2.03040	3021	1.87650	3452
4.05800	428	3.48440	860	3.05010	1292	2.70900	1724	2.43750	2158	2.21550	2590	2.02890	3022	1.87520	3453
4.05500	429	3.48190	861	3.04790	1293	2.70700	1725	2.43570	2159	2.21390	2591	2.02740	3023	1.87390	3454
4.05210	430	3.47940	862	3.04580	1294	2.70500	1726	2.43390	2160	2.21230	2592	2.02580	3024	1.87250	3455
4.04910	431	3.47690	863	3.04360	1295	2.70300	1727	2.43210	2161	2.21070	2593	2.02430	3025	1.87120	3456

Calibration des données VIRTIS

Le signal reçu par VIRTIS est calibré en une grandeur physique appelée luminance (ou *radiance* en anglais). Elle représente une puissance rayonnée dans une direction donnée par élément de surface et par élément d'angle solide. L'unité est donc le $W.m^{-2}.sr^{-1}$. Dans certains cas, y compris celui de VIRTIS, une dépendance en longueur est présente pour donner ainsi des $W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$.

Alors qu'on utilise cette radiance dans les études thermiques, on préfère parler en facteur de radiance ou en réflectance bidirectionnel lorsque l'on étudie les spectres d'une surface dans le domaine de longueur d'onde où elle n'est pas influencée par l'émission thermique. Pour cela, il est nécessaire de prendre en compte l'éclairement solaire (que l'on nomme souvent « flux » et que l'on note πF) qui correspond à l'éclairement solaire E_S (en $W.m^{-2}.\mu m^{-1}$) rapporté à la distance héliocentrique R (en UA) au moment de l'observation. Ce flux solaire correspondant au spectre de référence de R. Kurucz (« *KURUCZ_VIRTIS_RESAMPLED_IR_HIGH_v10.txt* » pour la calibration d'un fichier infrarouge par exemple) :

$$E_S(R) = \pi F = \frac{E_S}{R^2}$$

À partir de la radiance mesurée par VIRTIS et de cet éclairement on définit la réflectance bidirectionnelle (r), valable pour une géométrie quelconque à l'éclairement solaire normal (avec $\mu_0 = \cos i$, $\mu = \cos e$ et i, e, g les angles d'incidence, d'émergence et de phase). La réflectance bidirectionnelle est en sr^{-1} et avec L la luminance venant à la surface on a :

$$r(\mu_0, \mu, g) = \frac{R^2 L(\mu_0, \mu, g)}{E_S}$$

Enfin, à partir de cette réflectance bidirectionnelle on définit le facteur de radiance (*RADF* pour *RADiance Factor*, noté également $\frac{I}{F}$) en divisant la réflectance bidirectionnelle par celle d'une surface lambertienne équivalente à l'objet mais observée à incidence nulle ($L_L(\mu_0 = 1)$). C'est une grandeur adimensionnée couramment utilisé en télédétection planétaire et donc définit comme :

$$RADF = \frac{L(\mu_0, \mu, g)}{L_L(\mu_0 = 1)} = \pi r$$

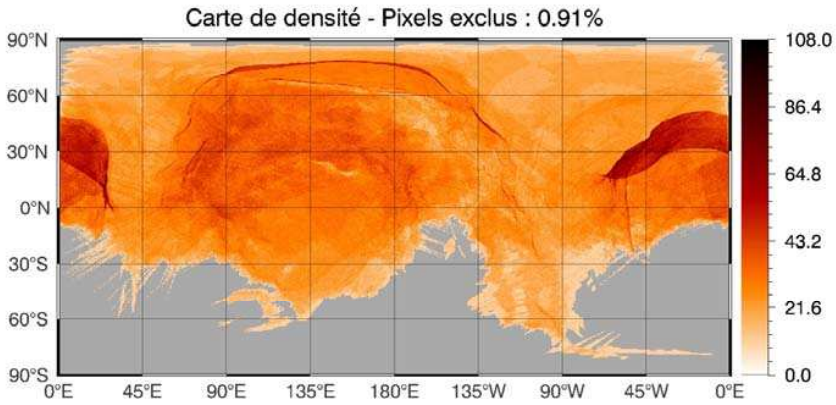
Ici sont données les références des versions de calibration des fichiers utilisés dans l'étude photométrique. Dans le futur, la calibrations des données VIRTIS est susceptible d'évoluer.

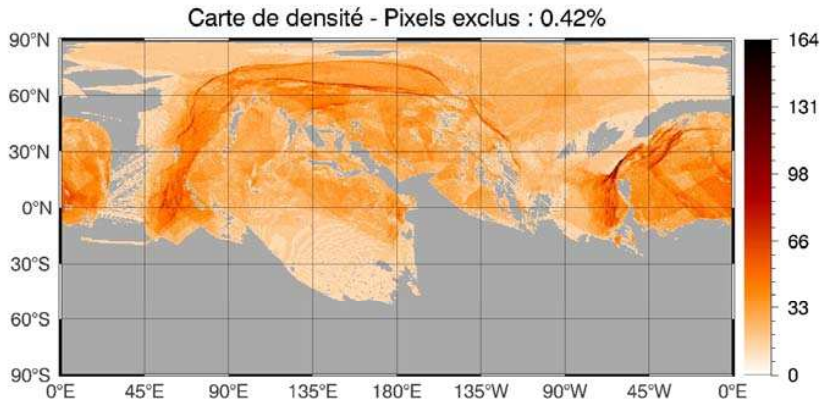
- Pour VIRTIS-M les données « *ARTIFACT-REMOVED* » calibrées en réflectance (I/F) dans leur version « *refl_ar_1.0.0* » ont été utilisées.
- Pour VIRTIS-H les données utilisées sont calibrées en radiance (voir 9.5.3) avec la version de logiciel « *CALIBROS_1.2_150126* ».
- La géométrie utilisée est celle de la version « *GEOROS_7.0e* ».

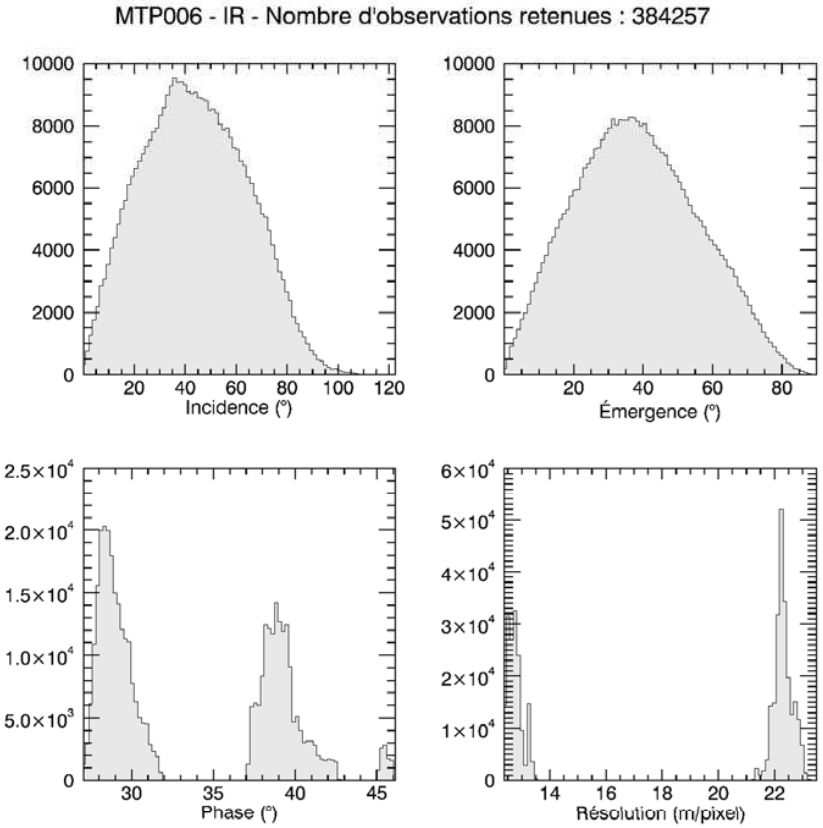
Cartes de densité et histogrammes des paramètres d'observations par MTP

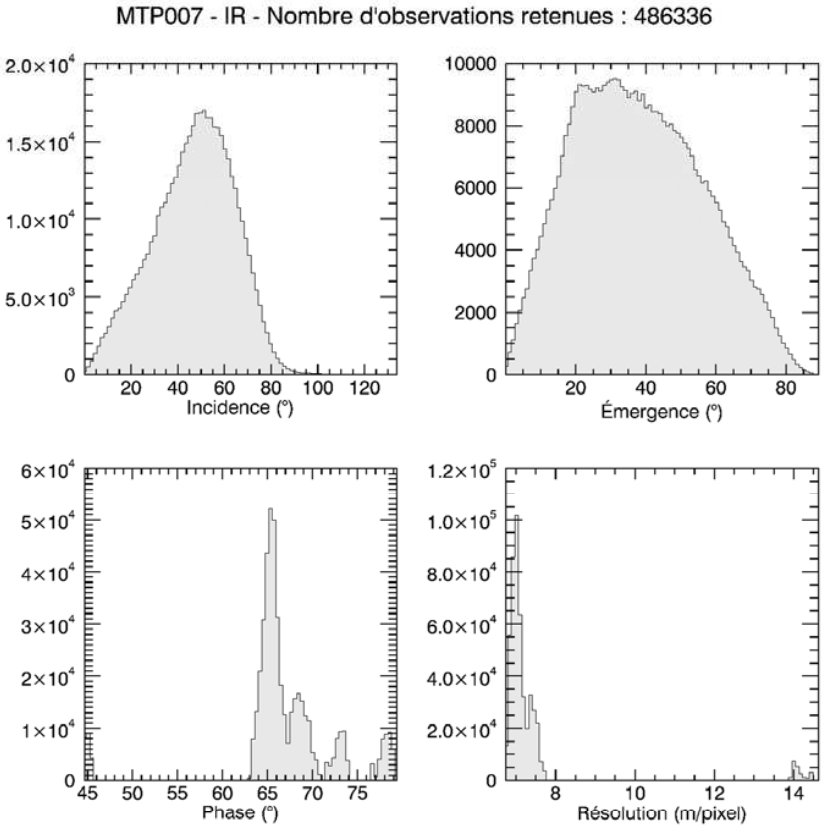
Les figures qui suivent sont un bilan des observations VIRTIS-M visible et infrarouge ainsi que VIRTIS-H sur l'ensemble de la mission. Le « nombre d'observations retenues » comptabilise les pixels sélectionnés qui observent le noyau pour chaque cube et pour chaque MTP. Par exemple le MTP006 de VIRTIS-M infrarouge comptabilise 334 257 pixels. Ces observations, pour être sélectionnées, satisfont un niveau de qualité définie par différents critères : altitude maximum de 450 km, bon échantillonnage pour éviter les flous, niveau de signal suffisant etc... Ce dernier critère implique notamment que les pixels du noyau présents dans le champ de l'instrument mais dans l'ombre (et dont on ne reçoit peu ou pas de signal) ne sont pas retenus. Ces histogrammes ne sont donc pas à prendre comme référence absolue mais donne une idée globale du jeu de données VIRTIS. De plus, dans l'étude photométrique de ce manuscrit, toutes les observations n'ont pas été utilisées, notamment celles dont les angles d'émergence ou d'incidence sont trop élevés (voir chapitre 5 page 75).

Concernant les cartes de densité, de 0.5° de résolution, elles sont créées à partir du nombres d'observations/de pixels retenues auxquelles on applique un filtre afin de ne pas tracer celles qui provoquerait des artéfacts sur la carte. C'est le cas des observations qui passent le méridien $0° \rightarrow 360°$ ou d'observations réalisées à trop grandes distances. Ce filtre est arbitraire bien qu'indirectement lié à la résolution, déterminé manuellement après plusieurs itérations, et se base sur l'écart type calculé sur les coordonnées des quatre coins du pixels. À la fois pour la latitude et la longitude si cet écart type dépasse 30 pour VIRTIS-M et 150 pour VIRTIS-H, le pixel correspondant n'est pas représenté. S'il ce critère est validé, alors la fonction « polyfillv » d'IDL est utilisée pour retrouver le champ couvert sur la grille, provoquant tout de même de temps à autres des artéfacts tels que des arêtes pointues. Dans de nombreux cas, la résolution de la grille est encore inadaptée à la résolution des observations (principalement pour VIRTIS-M), dans ce cas, seules les coordonnées correspondant au centre du pixel sont représentées. C'est ce qui a tendance à provoquer des artéfacts où par exemple les observations à haute résolution provoque des zones où la densité est très forte par exemple. La deuxième source d'artéfacts enfin peut être lié aux reliefs. Pour les observations VIRTIS-H, c'est la résolution du plus grand côté du pixel (rectangulaire, voir tableau 9.1 page 272 en annexe) qui est indiquée dans les histogrammes. Enfin, les angles d'indices, d'émergences et de phases peuvent varier bien au delà des valeurs classiques pour un corps planétaire sphérique en raison de la morphologie particulière, concave en l'occurrence, de 67P.

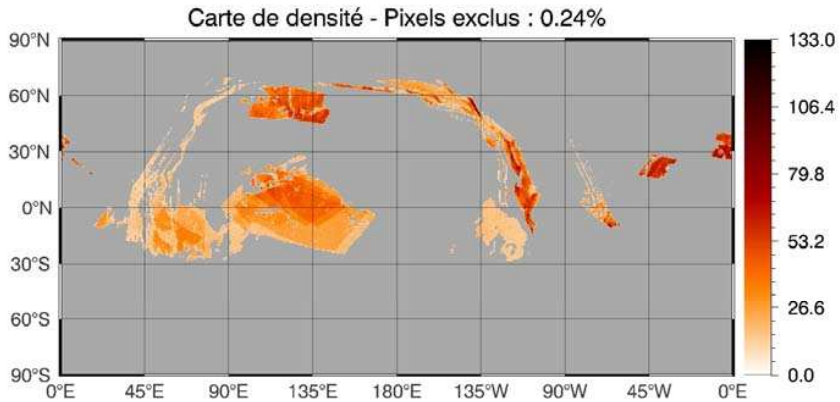

Carte de densité - Pixels exclus : 0.91%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
108.0
86.4
64.8
43.2
21.6
0.0

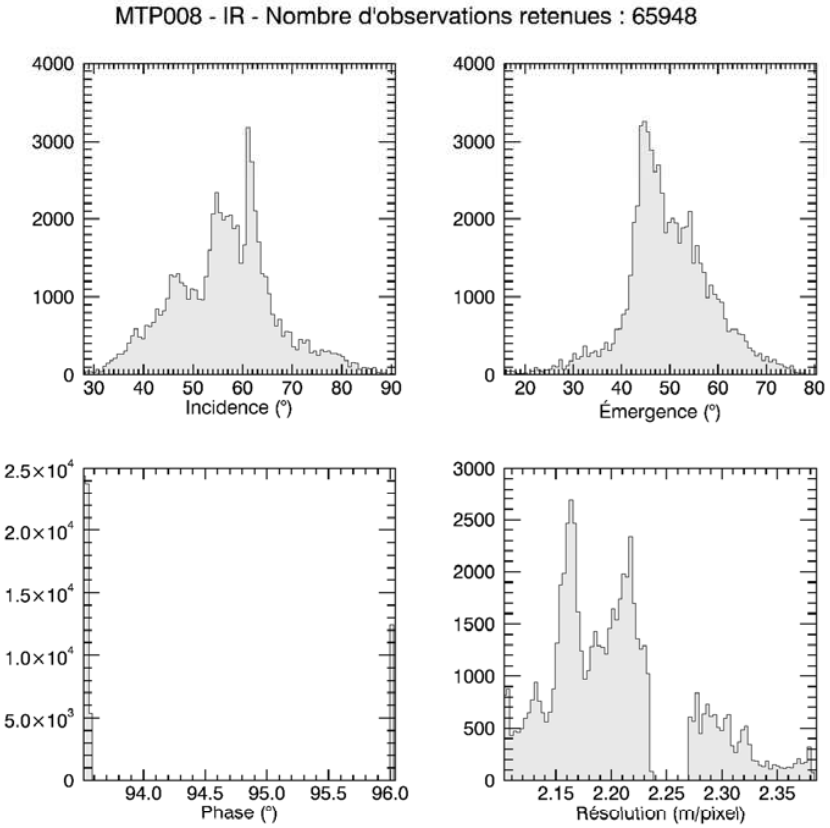

Carte de densité - Pixels exclus : 0.42%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
164
131
98
66
33
0

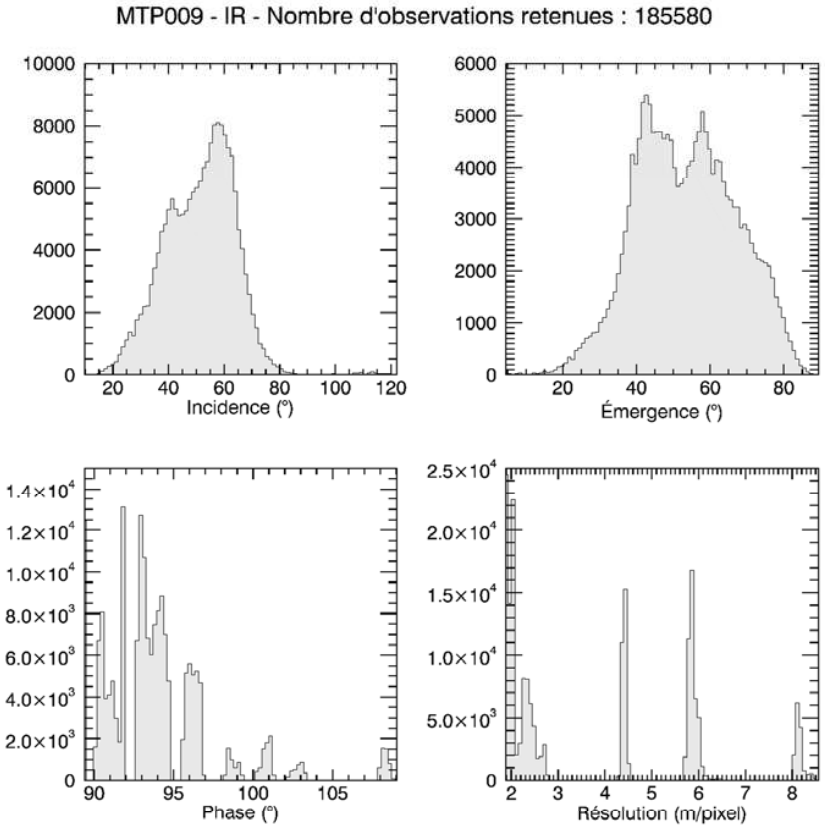

MTP006 - IR - Nombre d'observations retenues : 384257
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

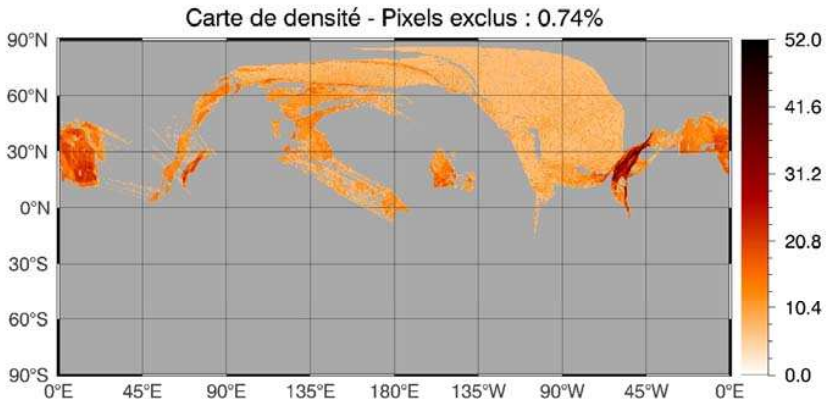

MTP007 - IR - Nombre d'observations retenues : 486336
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

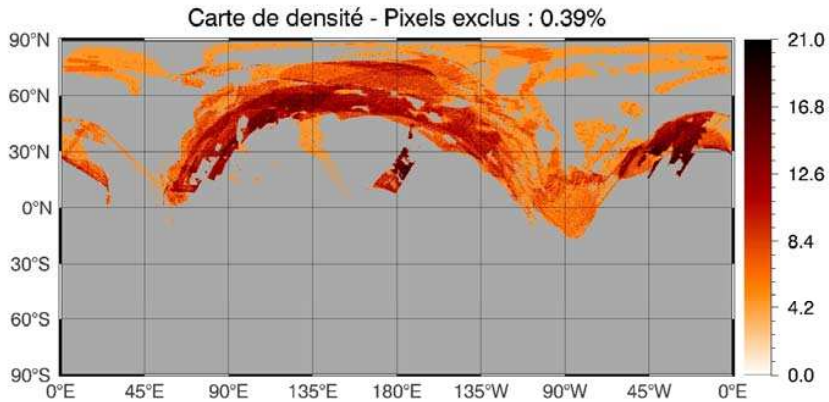
Carte de densité - Pixels exclus : 0%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
218
174
131
87
44
0

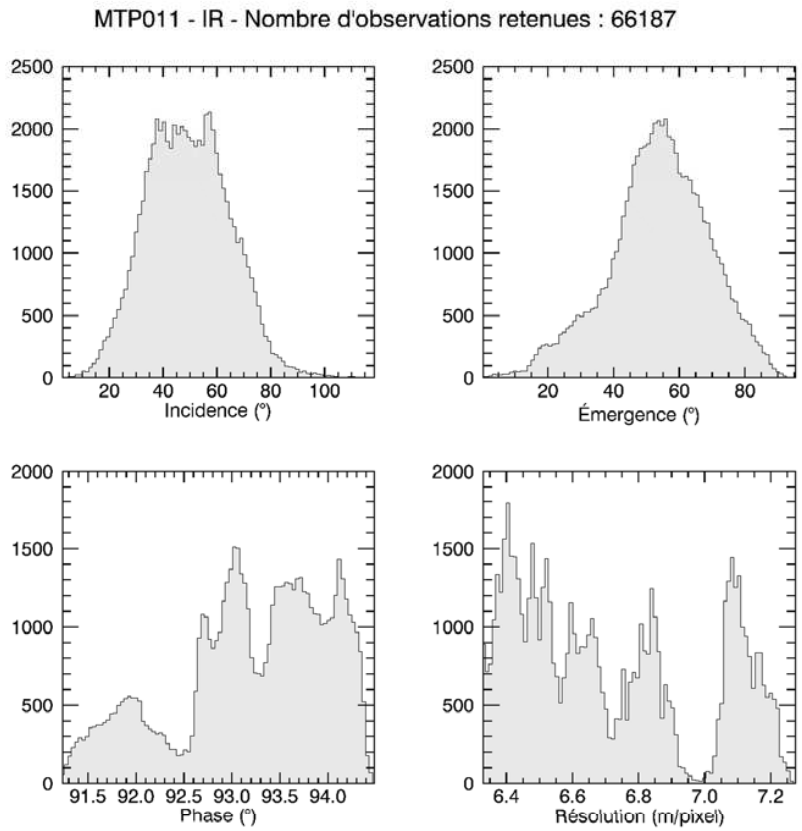

Carte de densité - Pixels exclus : 0.24%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
133.0
106.4
79.8
53.2
26.6
0.0

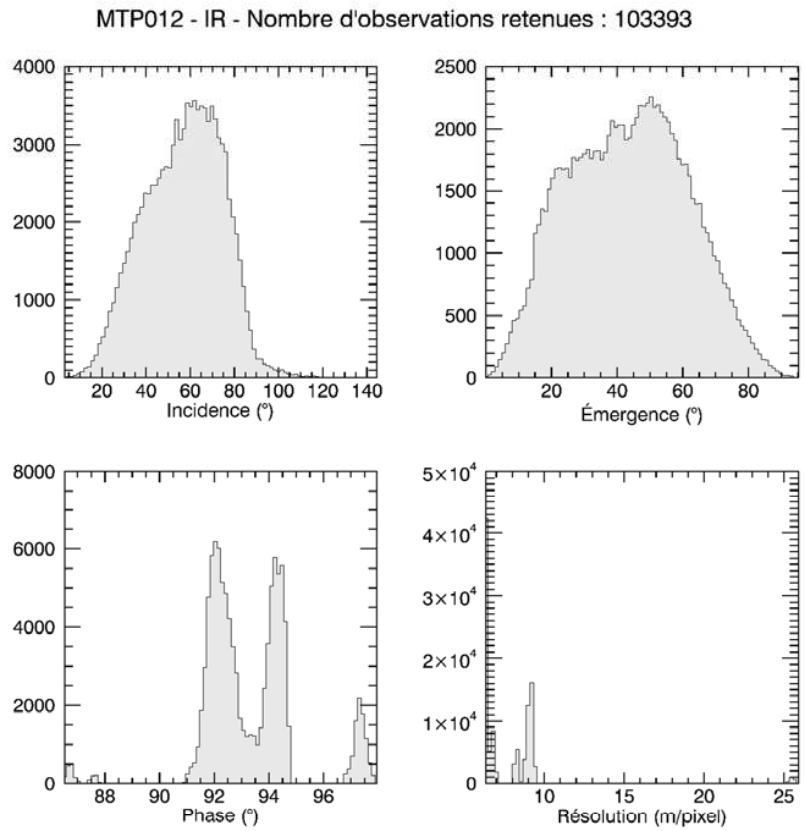

MTP008 - IR - Nombre d'observations retenues : 65948
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

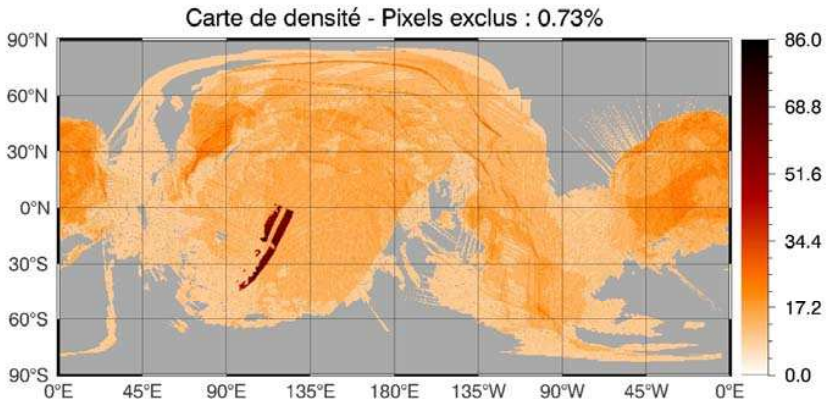

MTP009 - IR - Nombre d'observations retenues : 185580
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

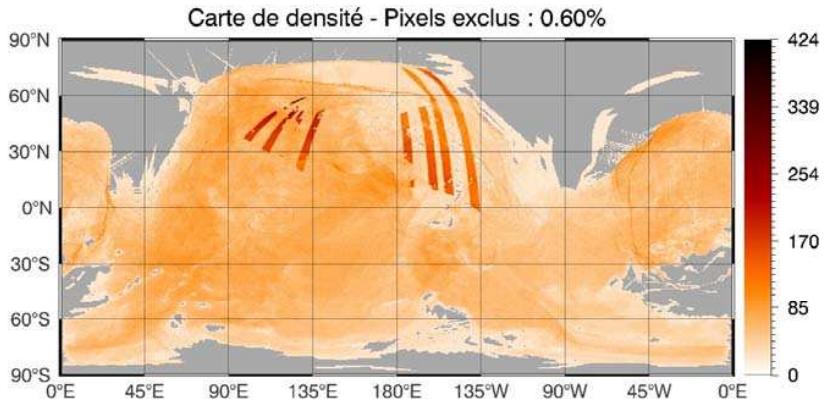

Carte de densité - Pixels exclus : 0.74%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
52.0
41.6
31.2
20.8
10.4
0.0

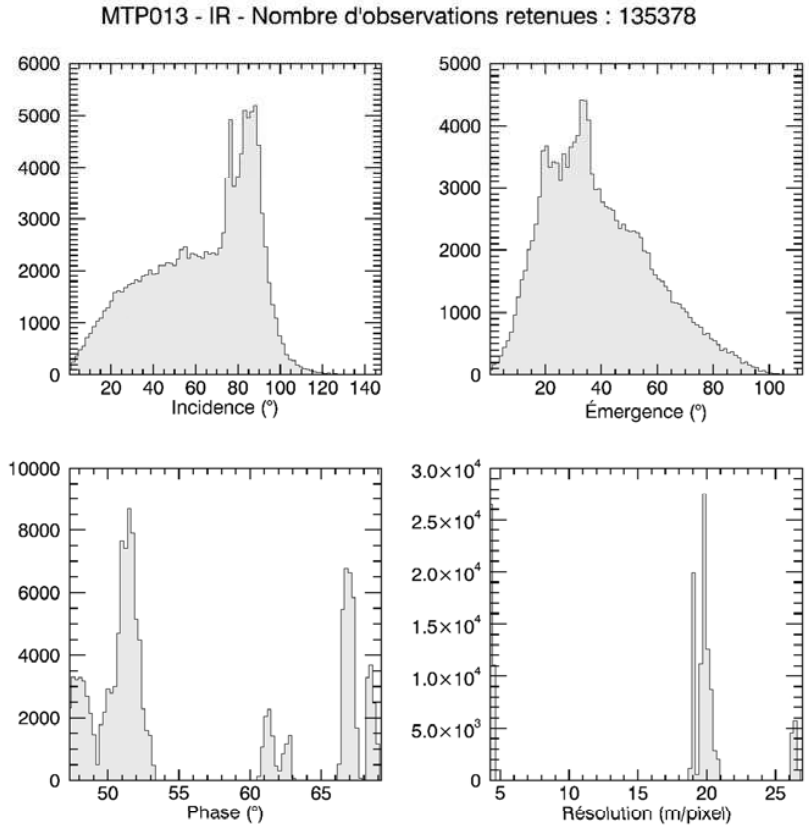

Carte de densité - Pixels exclus : 0.39%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
21.0
16.8
12.6
8.4
4.2
0.0

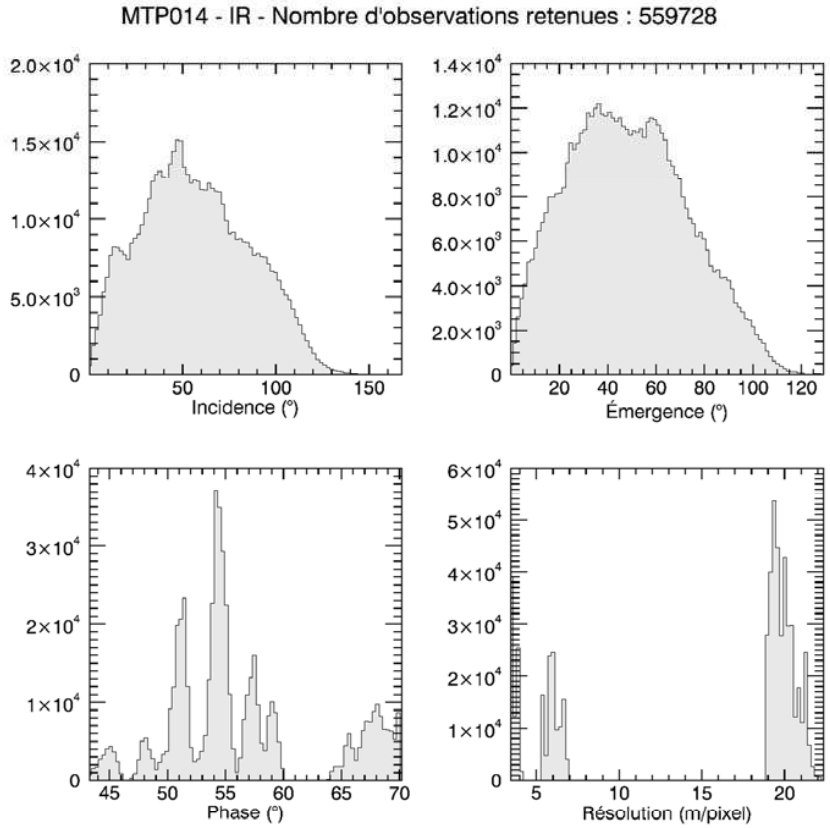

MTP011 - IR - Nombre d'observations retenues : 66187
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

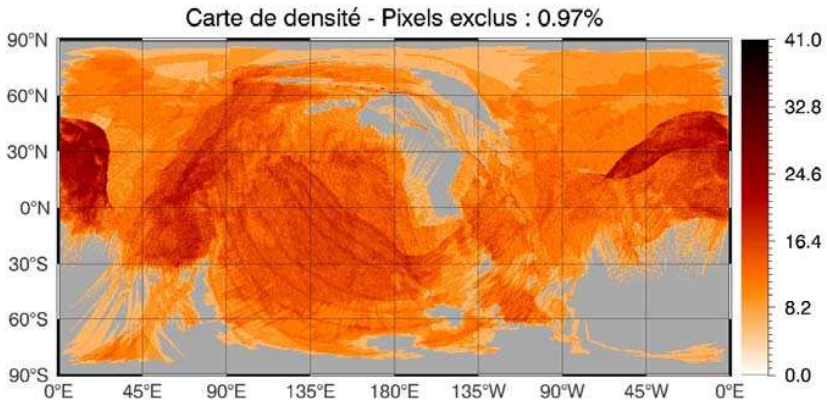

MTP012 - IR - Nombre d'observations retenues : 103393
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

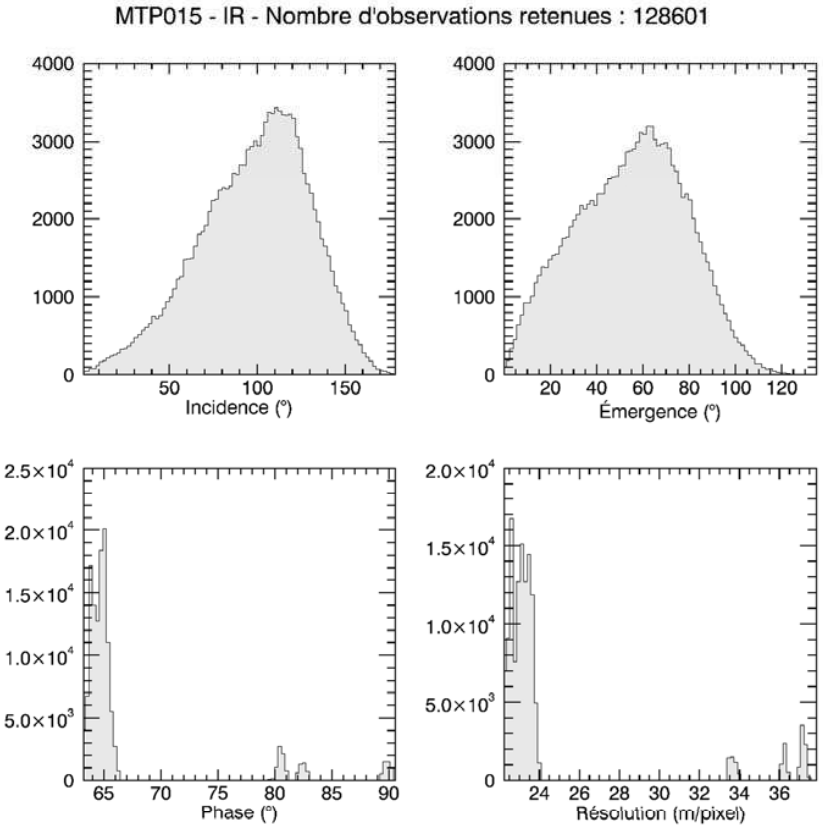

Carte de densité - Pixels exclus : 0.73%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
86.0
68.8
51.6
34.4
17.2
0.0

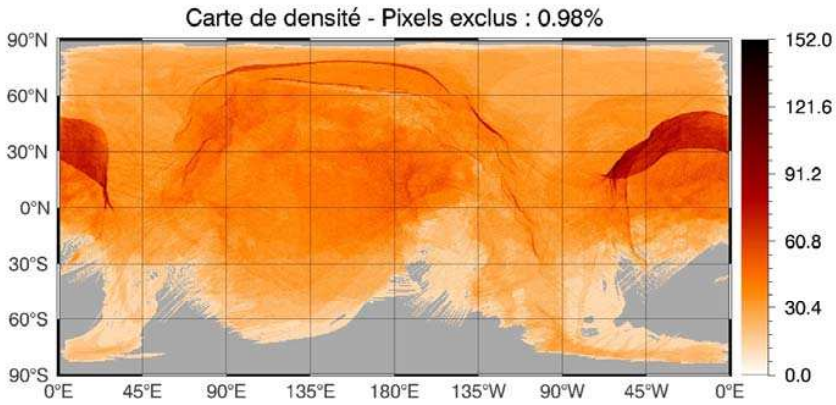

Carte de densité - Pixels exclus : 0.60%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
424
339
254
170
85
0

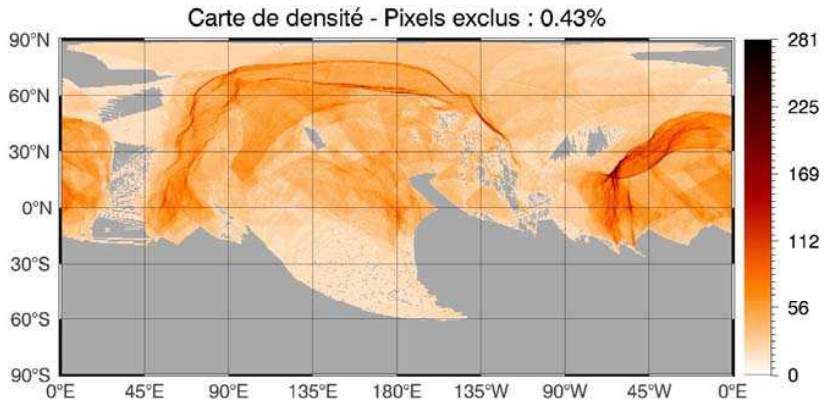

MTP013 - IR - Nombre d'observations retenues : 135378
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

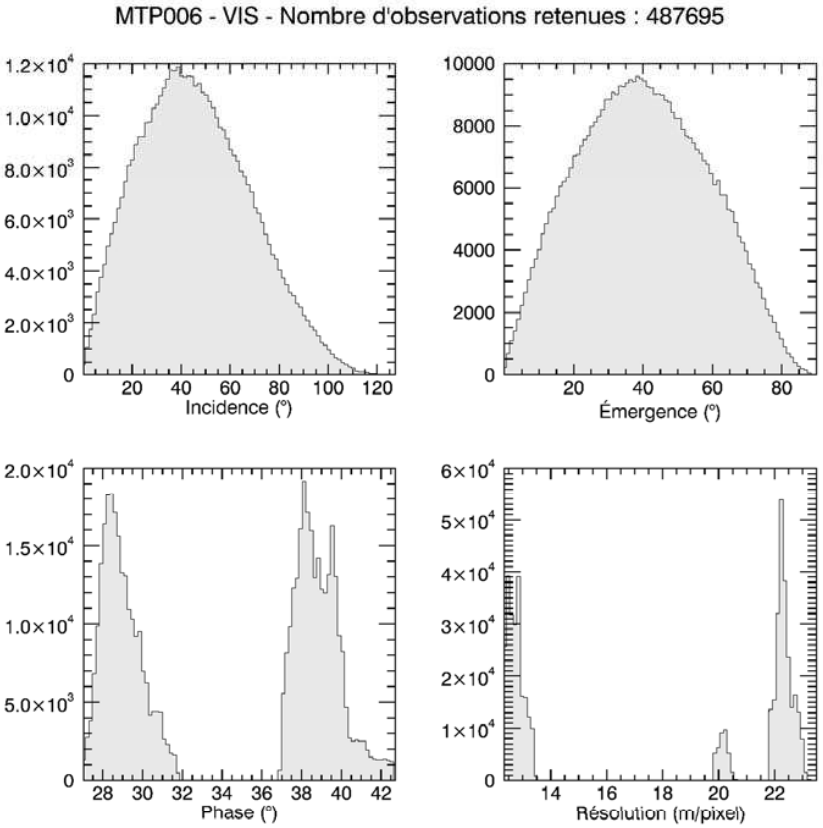

MTP014 - IR - Nombre d'observations retenues : 559728
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

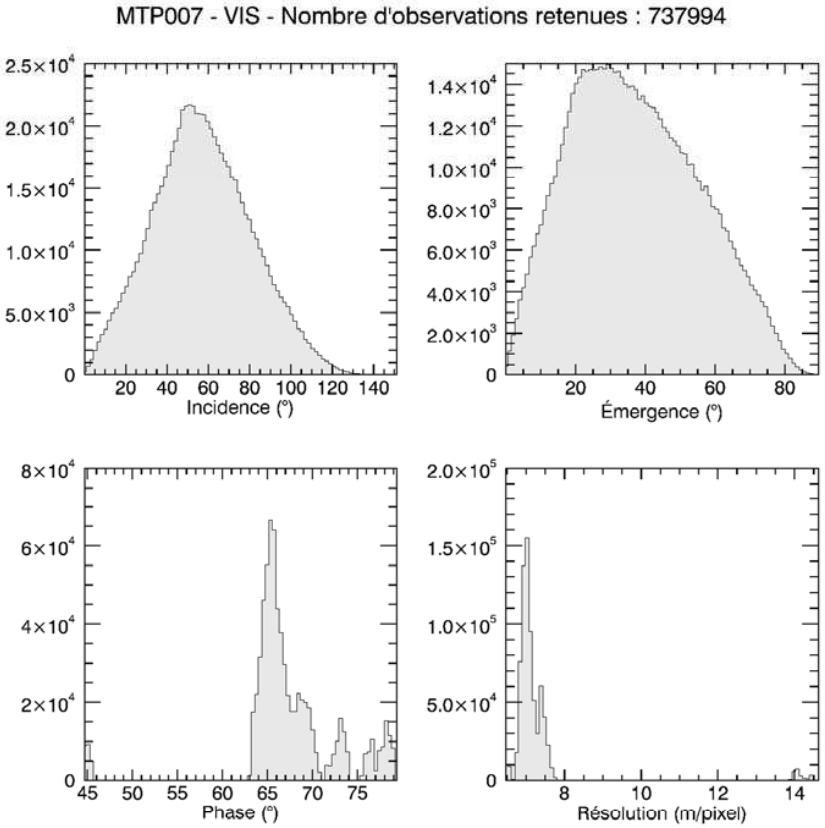

Carte de densité - Pixels exclus : 0.97%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
41.0
32.8
24.6
16.4
8.2
0.0

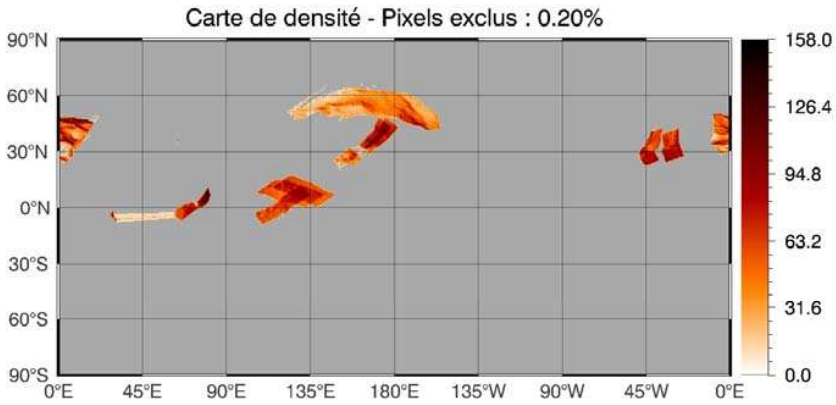

MTP015 - IR - Nombre d'observations retenues : 128601
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

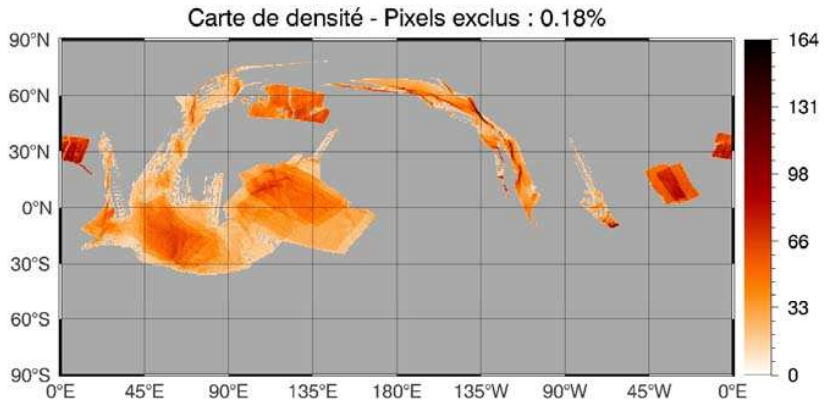

Carte de densité - Pixels exclus : 0.98%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
152.0
121.6
91.2
60.8
30.4
0.0

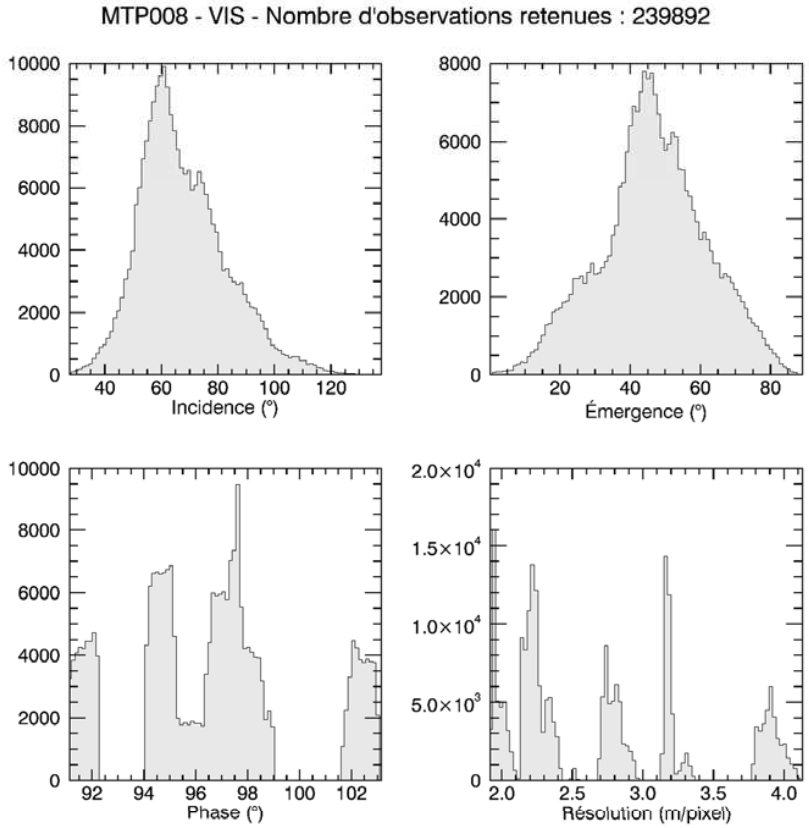

Carte de densité - Pixels exclus : 0.43%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
281
225
169
112
56
0

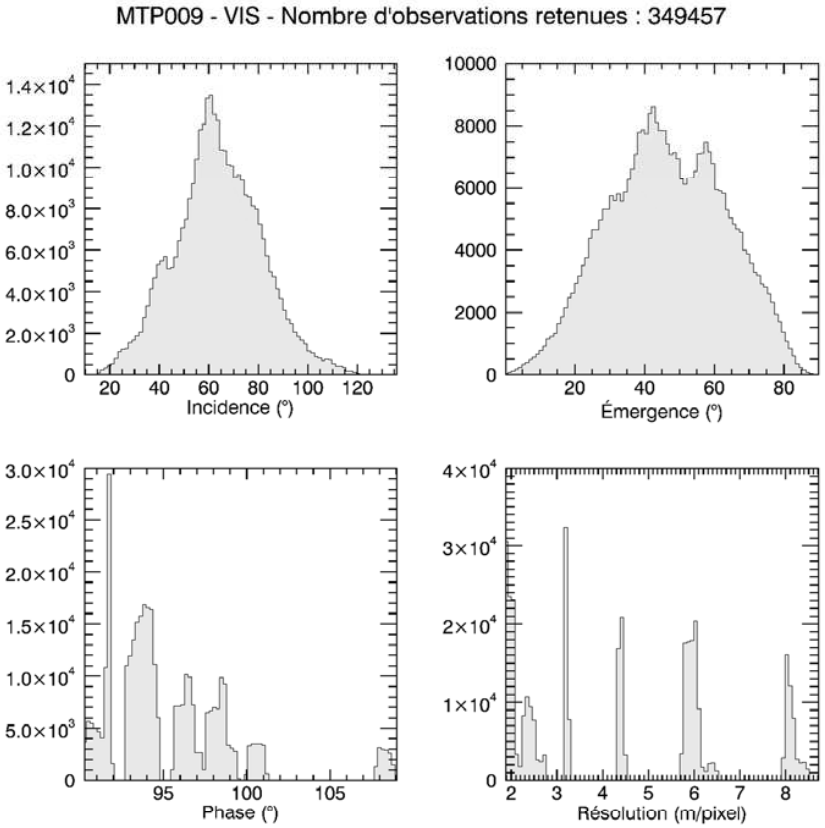

MTP006 - VIS - Nombre d'observations retenues : 487695
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

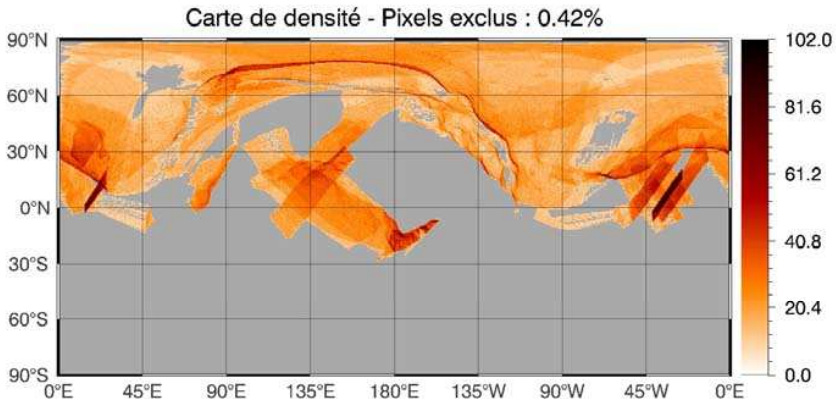

MTP007 - VIS - Nombre d'observations retenues : 737994
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

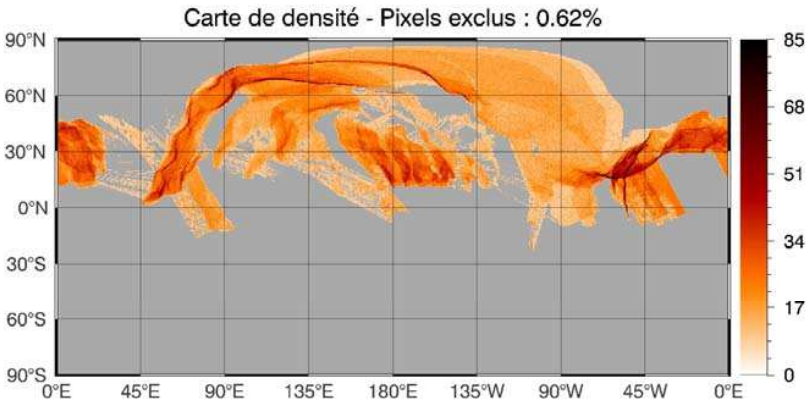

Carte de densité - Pixels exclus : 0.20%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
158.0
126.4
94.8
63.2
31.6
0.0

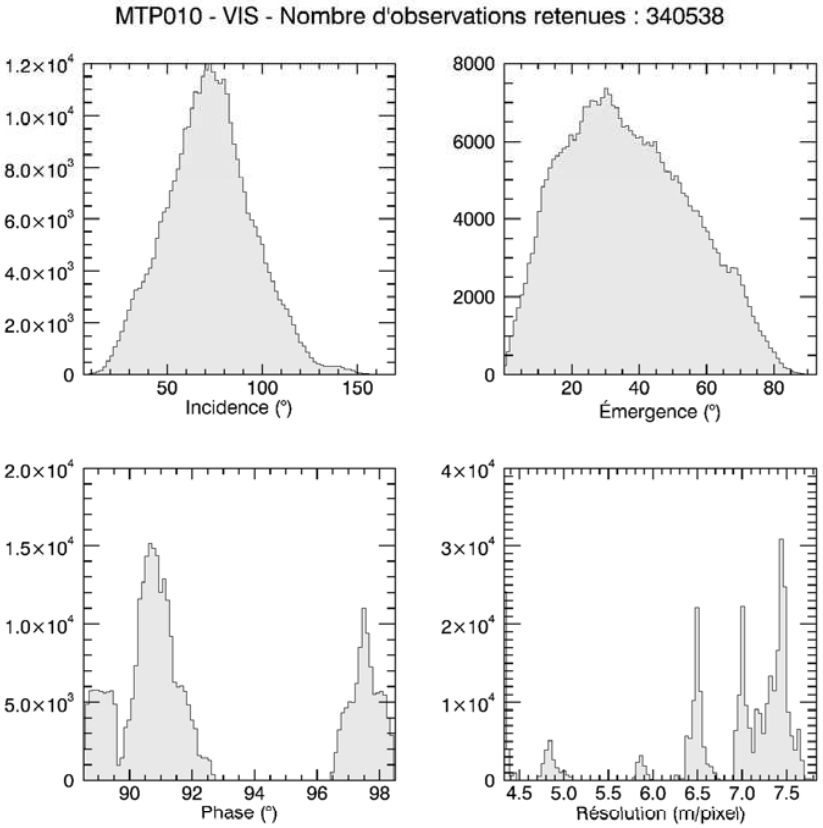

Carte de densité - Pixels exclus : 0.18%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
164
131
98
66
33
0

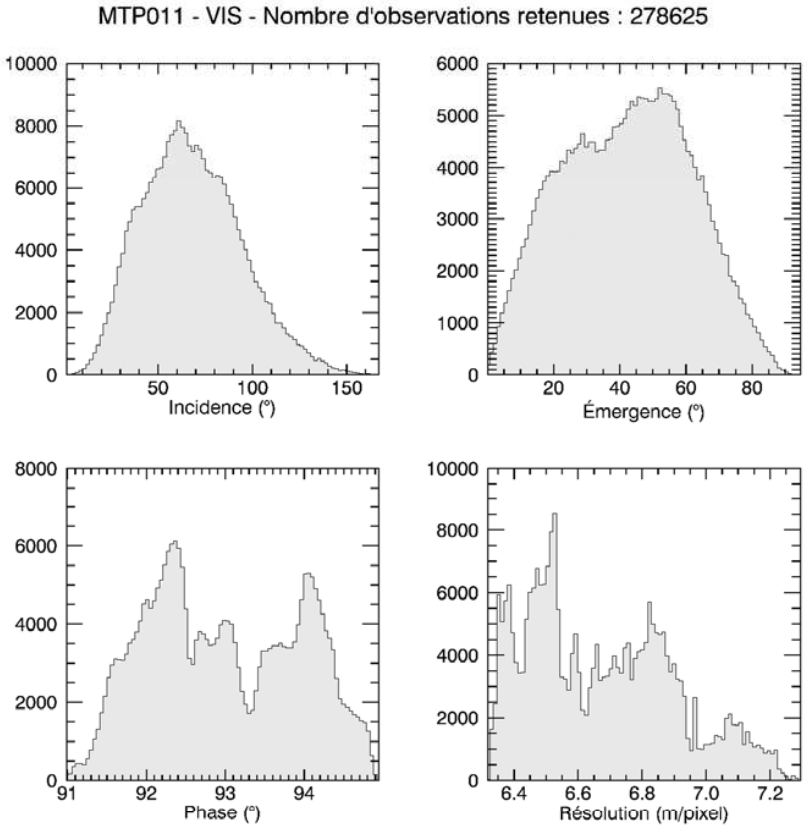

MTP008 - VIS - Nombre d'observations retenues : 239892
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

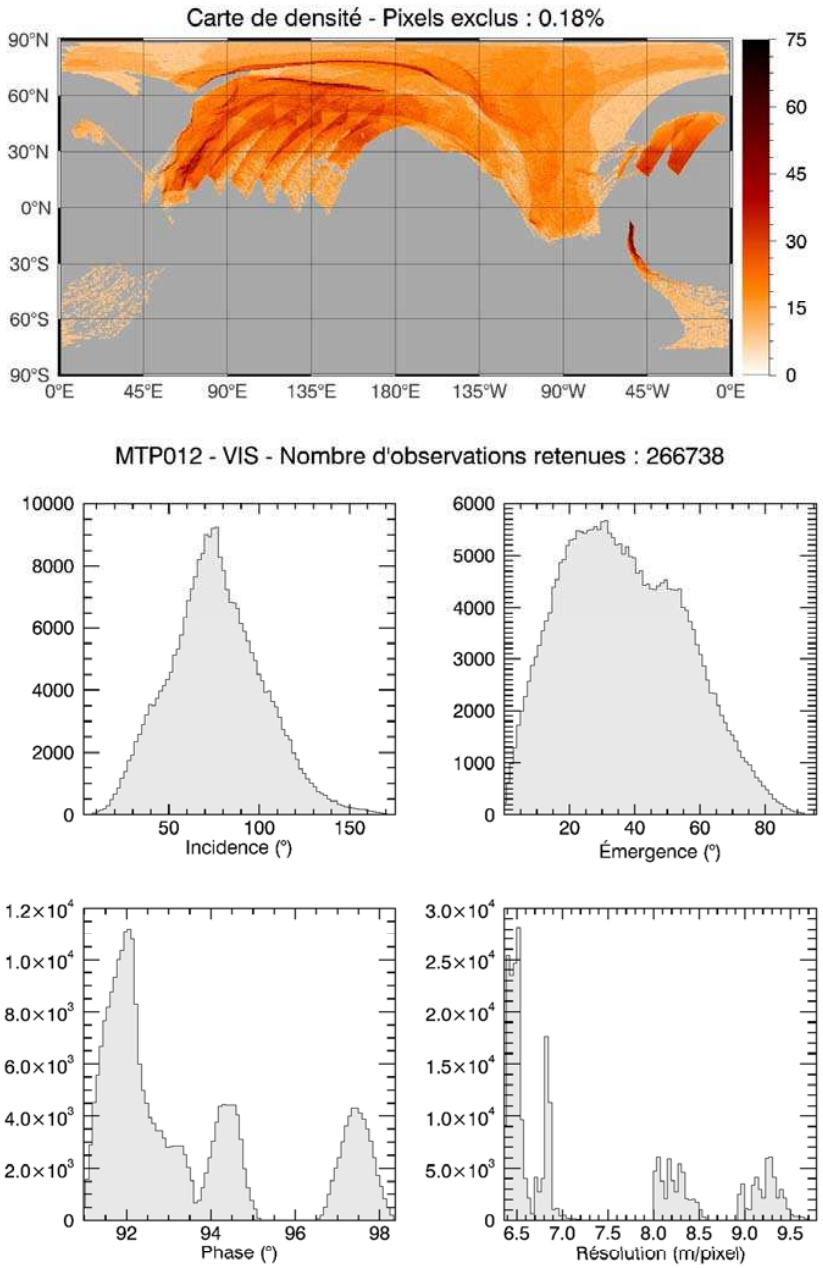

MTP009 - VIS - Nombre d'observations retenues : 349457
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

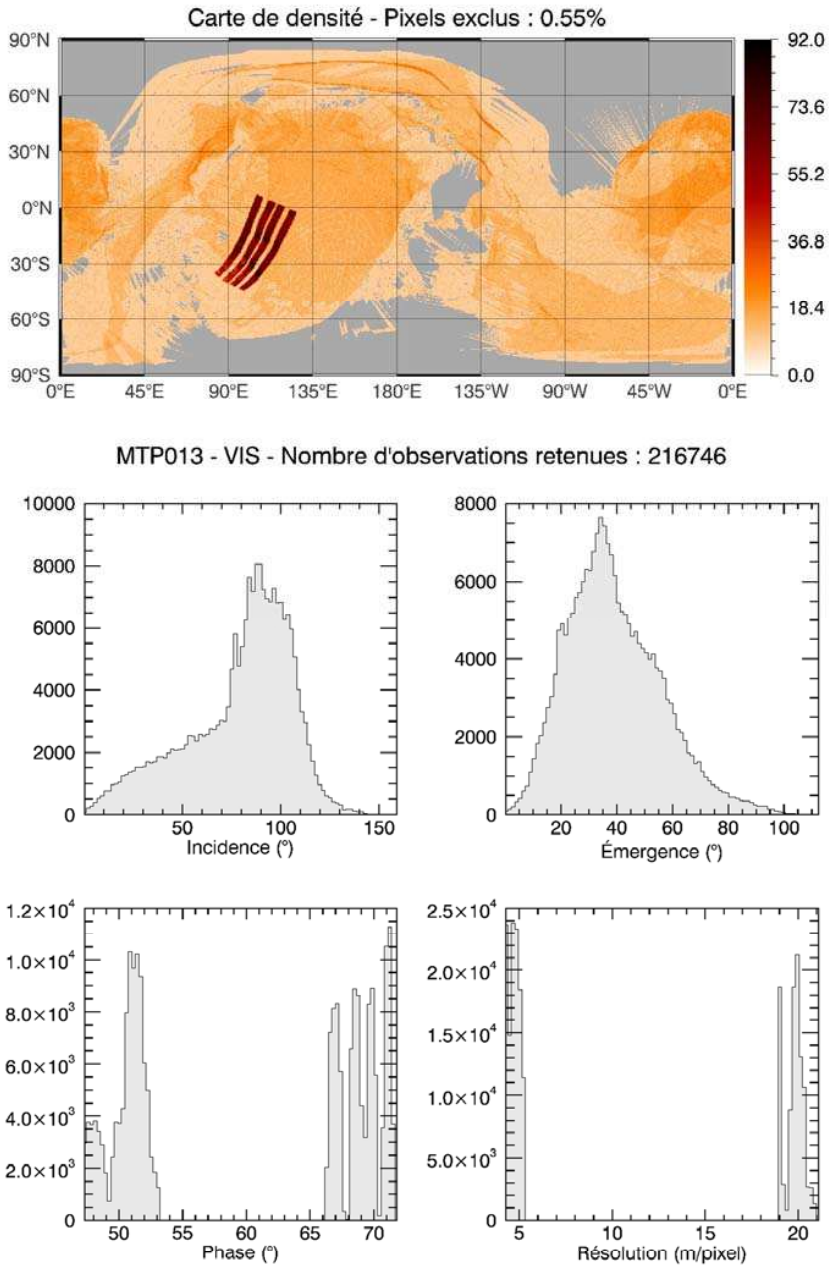

Carte de densité - Pixels exclus : 0.42%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
102.0
81.6
61.2
40.8
20.4
0.0

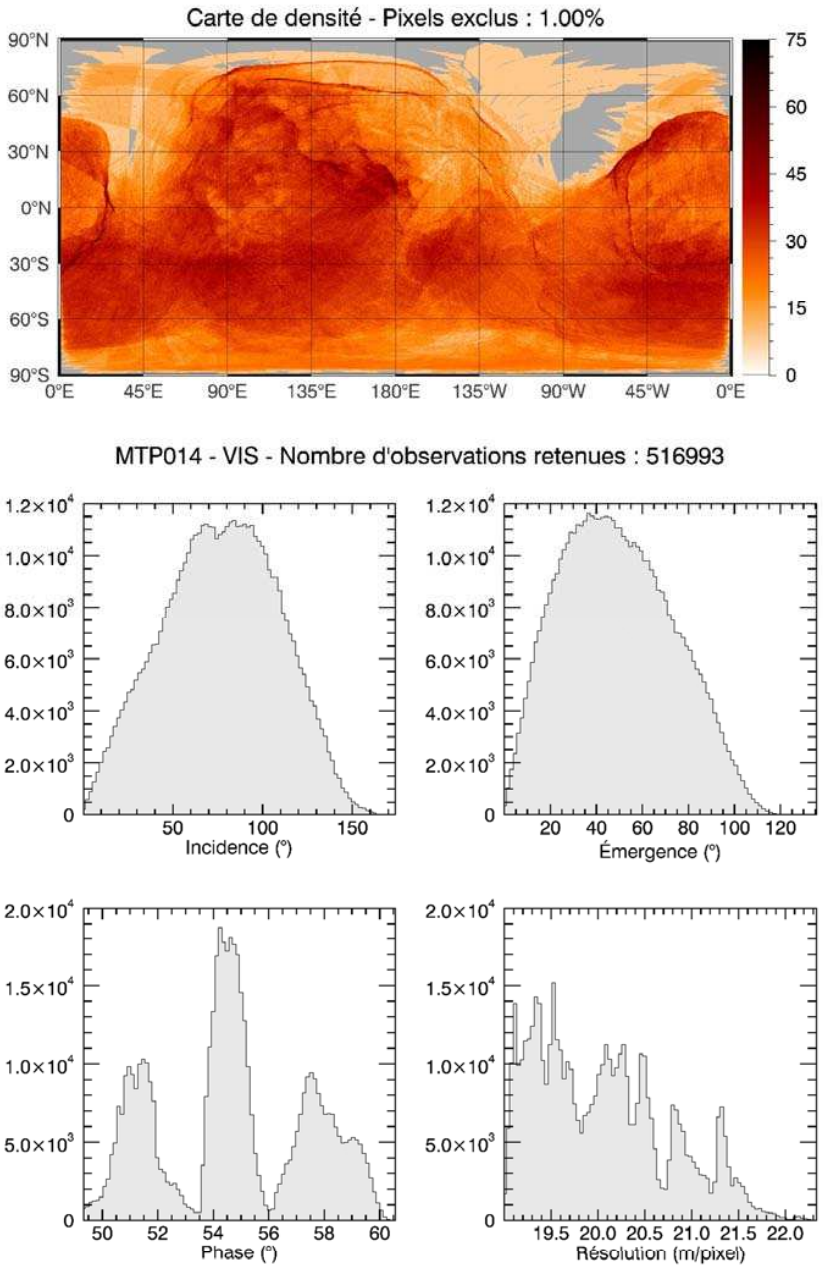

Carte de densité - Pixels exclus : 0.62%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
85
68
51
34
17
0

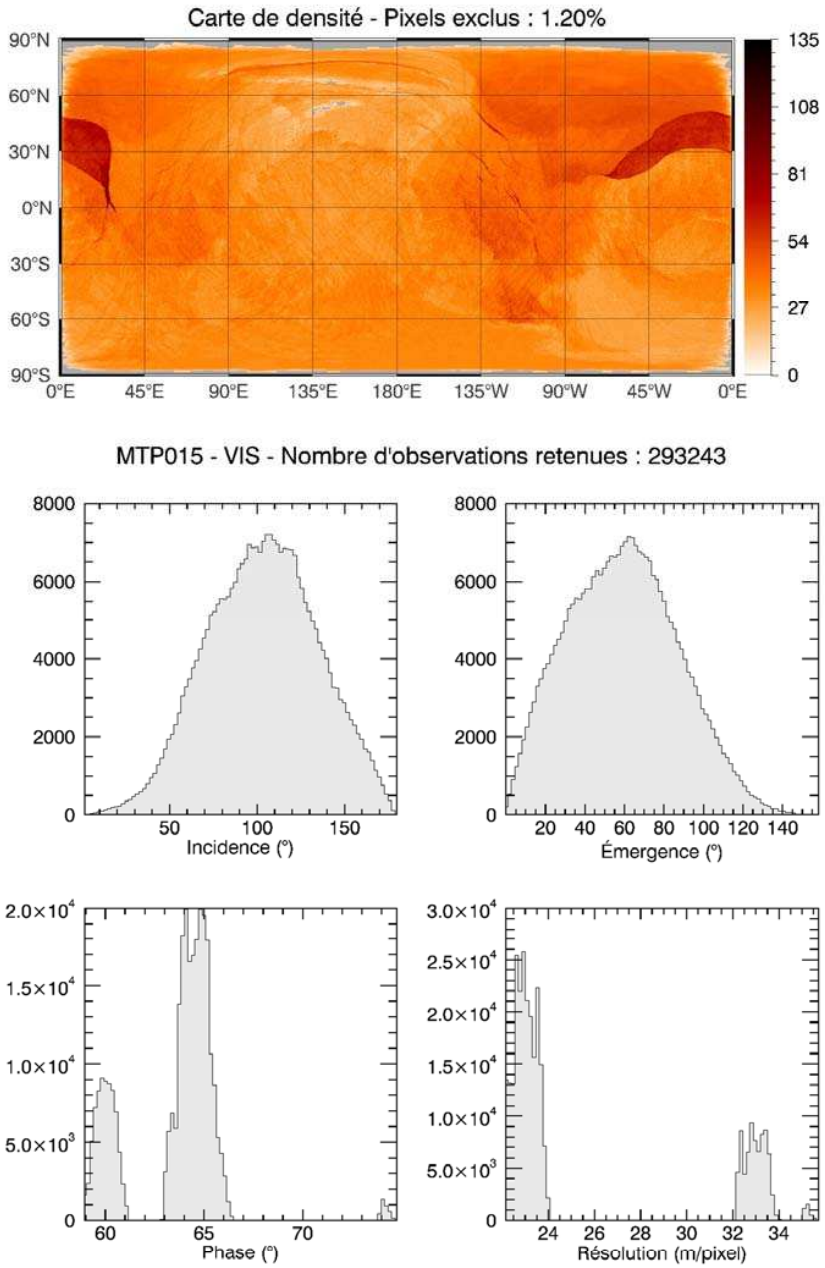

MTP010 - VIS - Nombre d'observations retenues : 340538
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

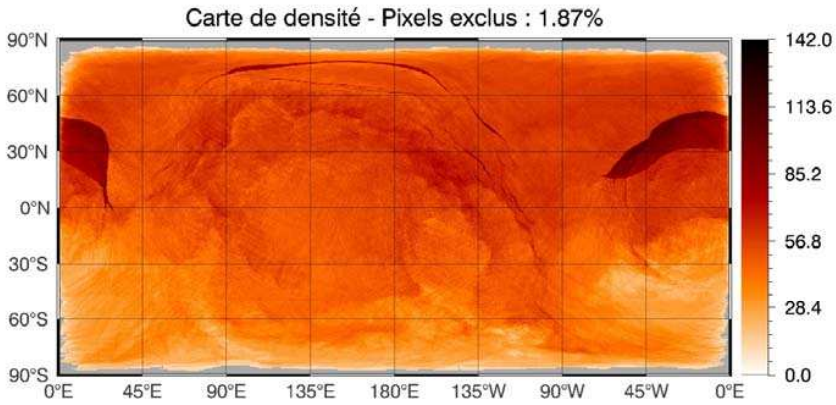

MTP011 - VIS - Nombre d'observations retenues : 278625
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

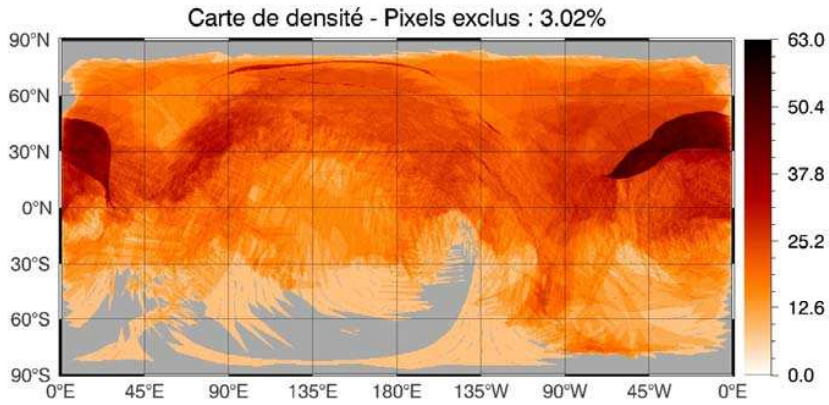

Carte de densité - Pixels exclus : 0.18%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
75
60
45
30
15
0
MTP012 - VIS - Nombre d'observations retenues : 266738
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

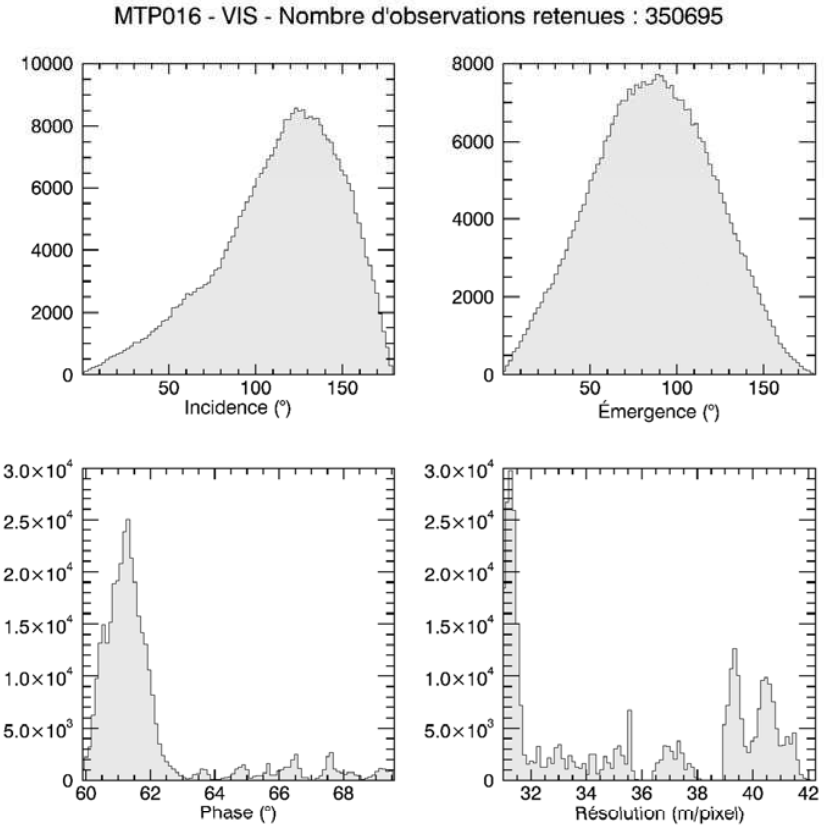

Carte de densité - Pixels exclus : 0.55%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
92.0
73.6
55.2
36.8
18.4
0.0
MTP013 - VIS - Nombre d'observations retenues : 216746
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

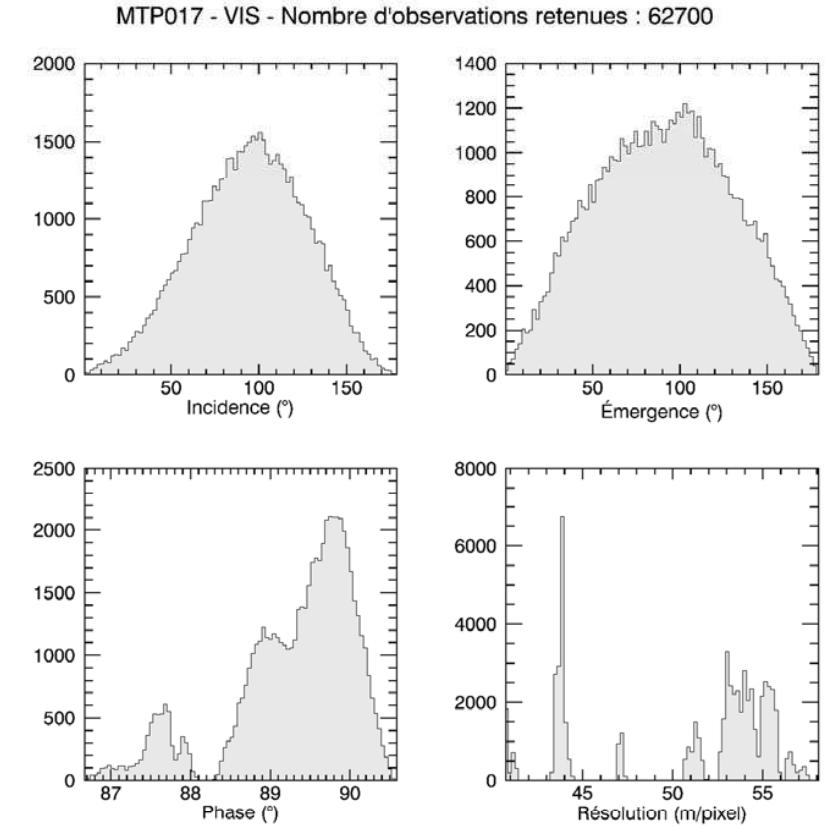

Carte de densité - Pixels exclus : 1.00%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
75
60
45
30
15
0
MTP014 - VIS - Nombre d'observations retenues : 516993
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

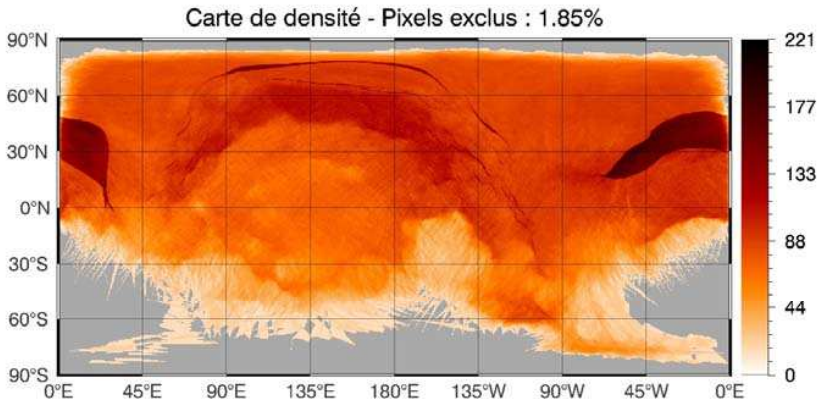

Carte de densité - Pixels exclus : 1.20%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
135
108
81
54
27
0
MTP015 - VIS - Nombre d'observations retenues : 293243
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

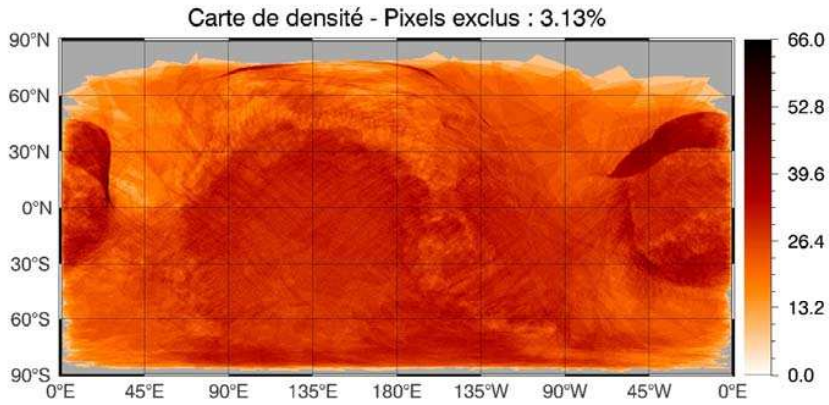

Carte de densité - Pixels exclus : 1.87%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
142.0
113.6
85.2
56.8
28.4
0.0

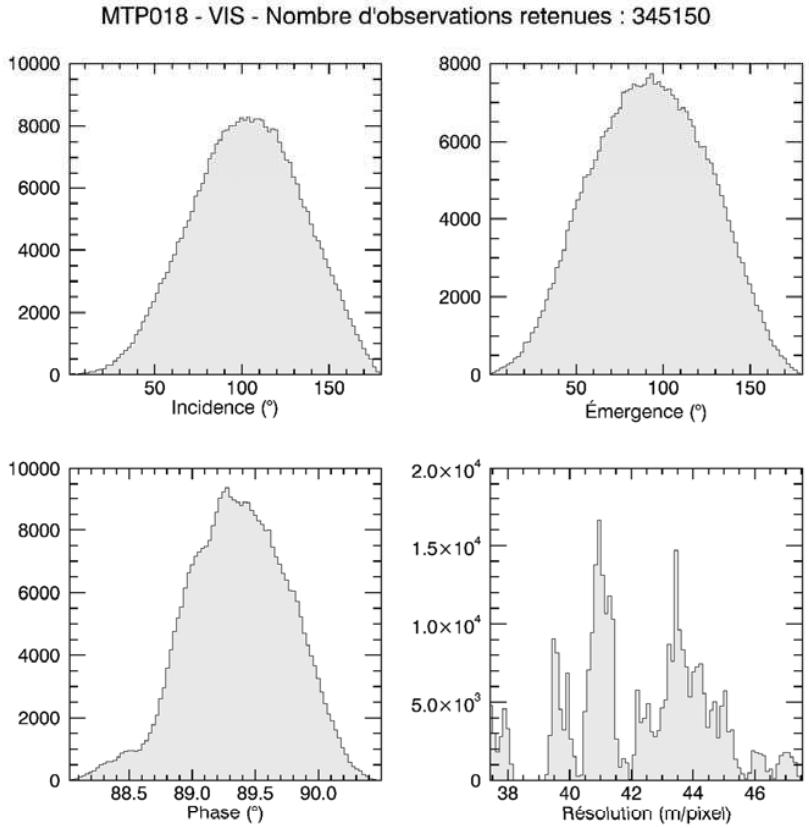

Carte de densité - Pixels exclus : 3.02%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
63.0
50.4
37.8
25.2
12.6
0.0

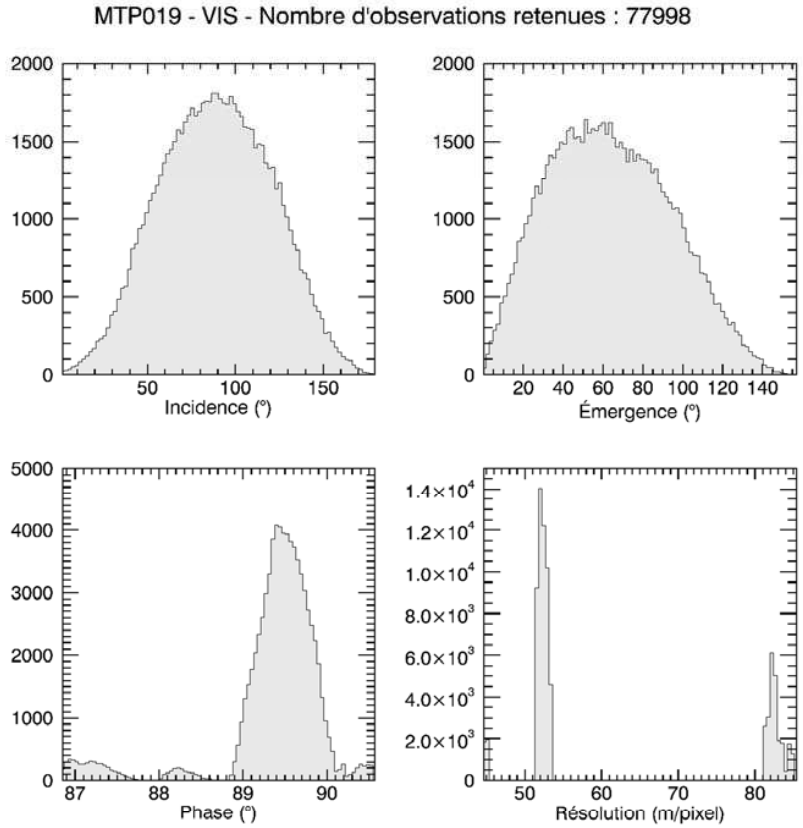

MTP016 - VIS - Nombre d'observations retenues : 350695
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

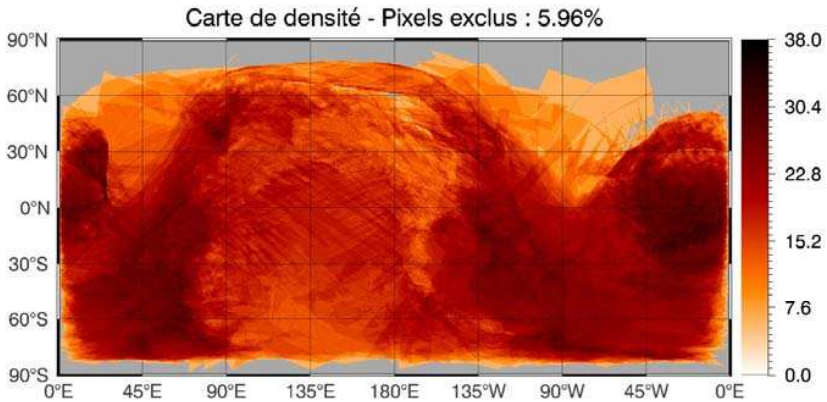

MTP017 - VIS - Nombre d'observations retenues : 62700
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

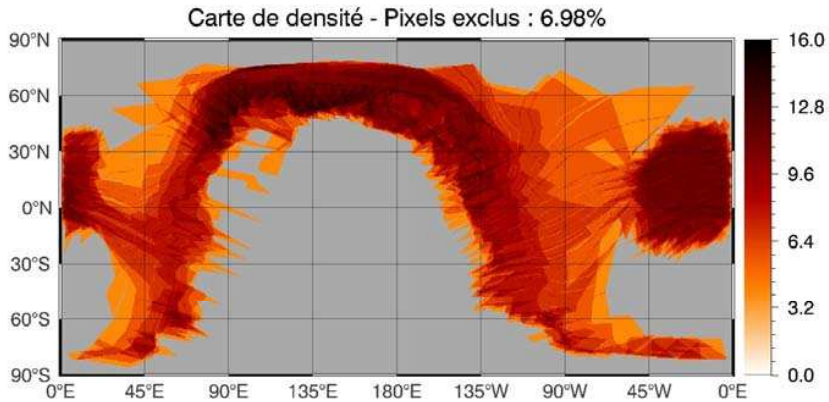

Carte de densité - Pixels exclus : 1.85%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
221
177
133
88
44
0

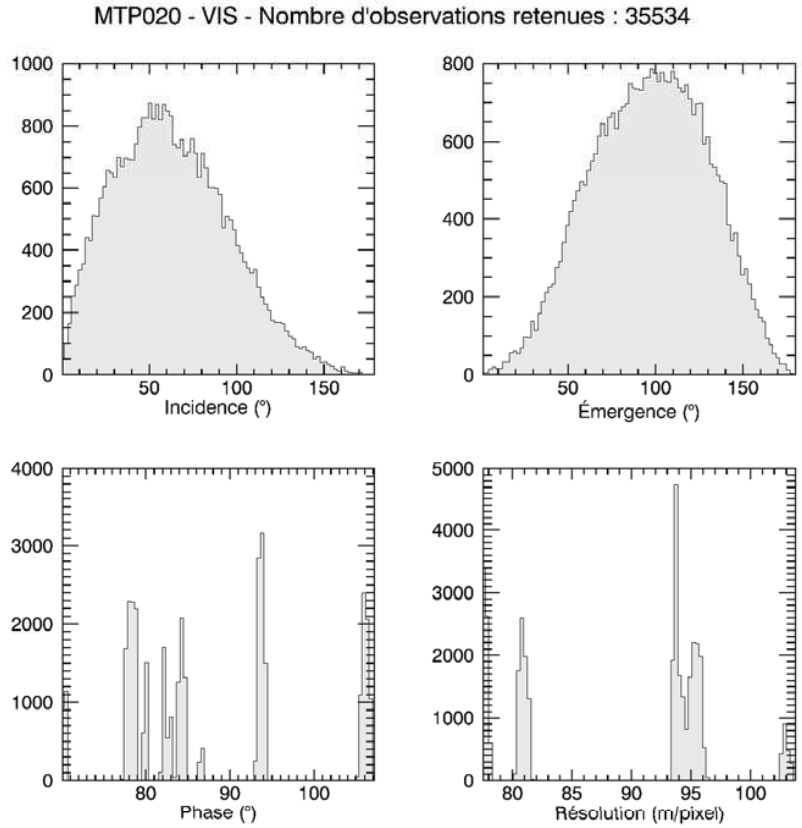

Carte de densité - Pixels exclus : 3.13%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
66.0
52.8
39.6
26.4
13.2
0.0

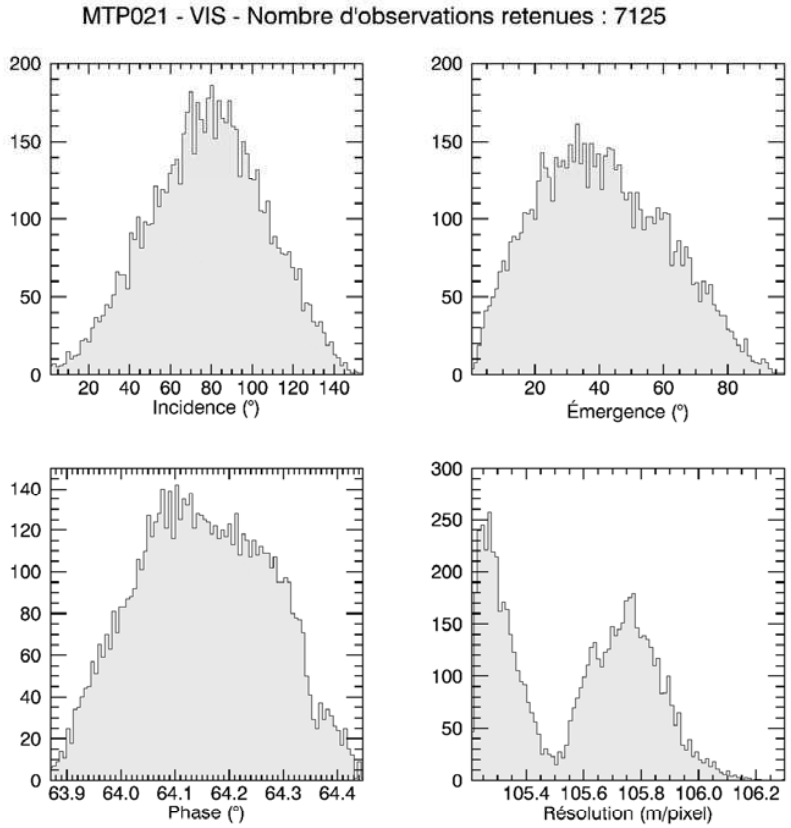

MTP018 - VIS - Nombre d'observations retenues : 345150
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

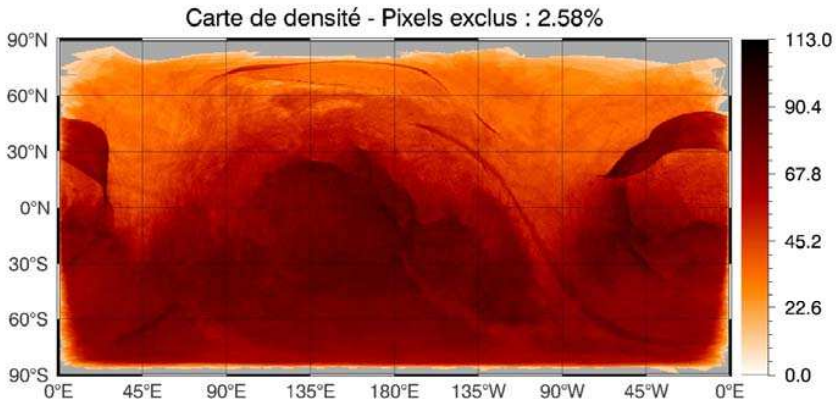

MTP019 - VIS - Nombre d'observations retenues : 77998
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

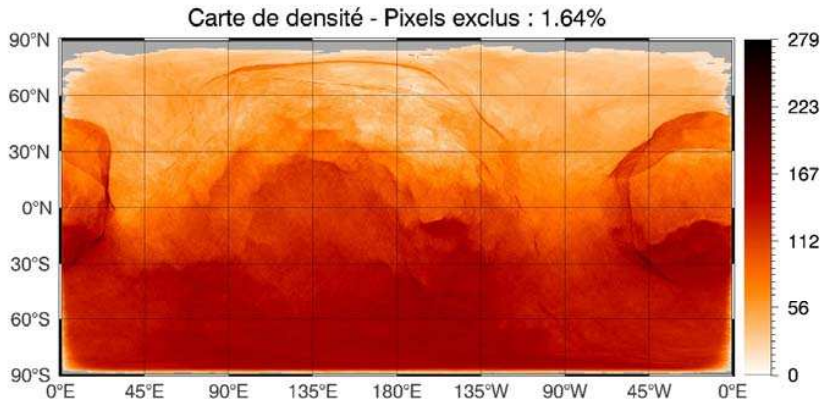

Carte de densité - Pixels exclus : 5.96%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
38.0
30.4
22.8
15.2
7.6
0.0

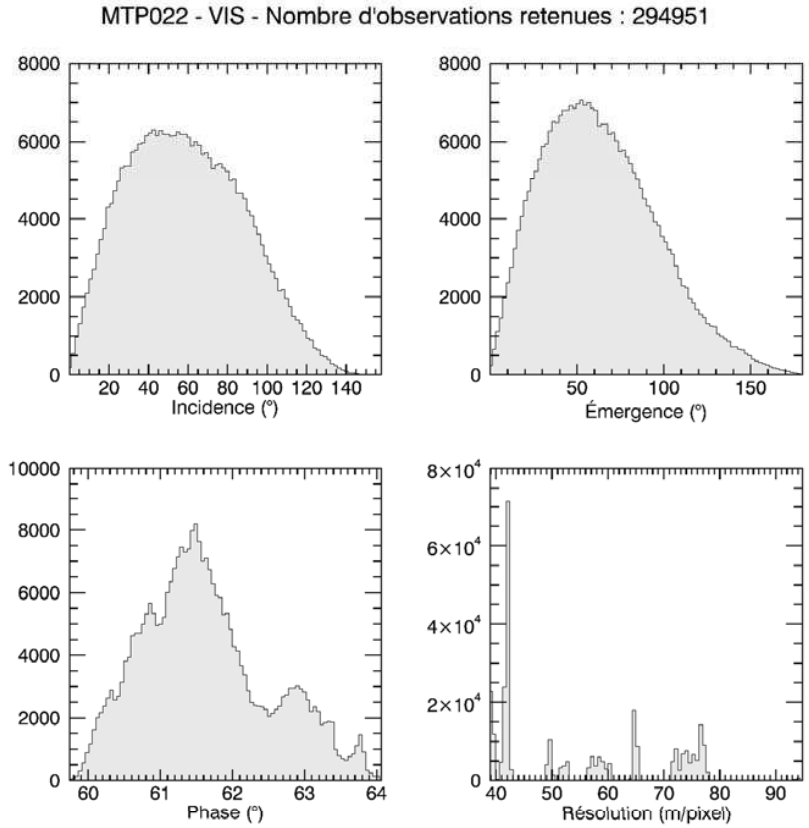

Carte de densité - Pixels exclus : 6.98%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
16.0
12.8
9.6
6.4
3.2
0.0

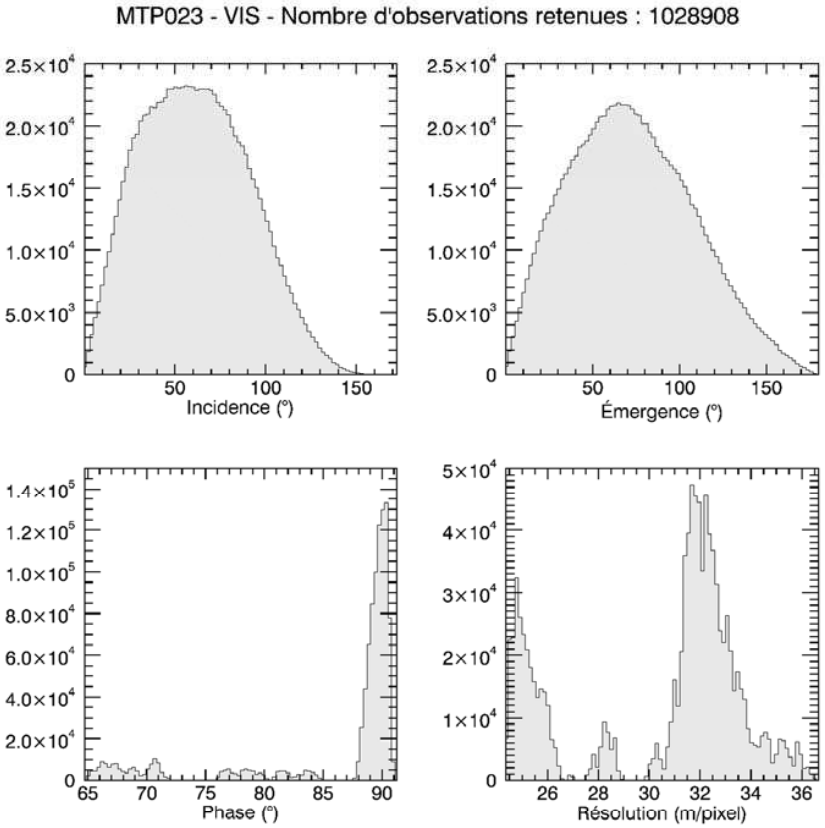

MTP020 - VIS - Nombre d'observations retenues : 35534
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

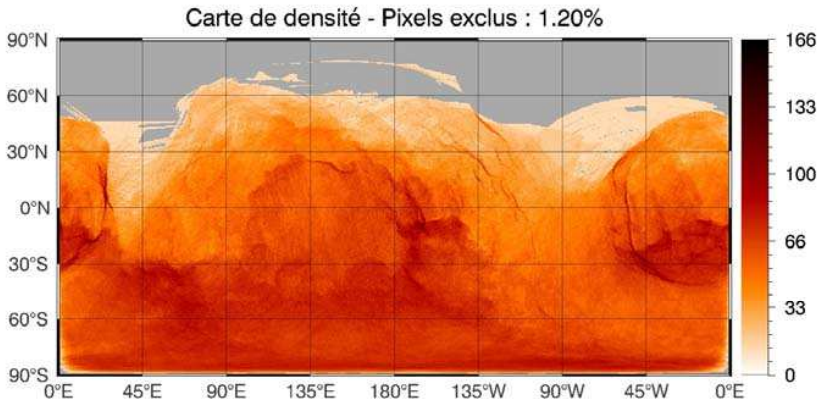

MTP021 - VIS - Nombre d'observations retenues : 7125
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

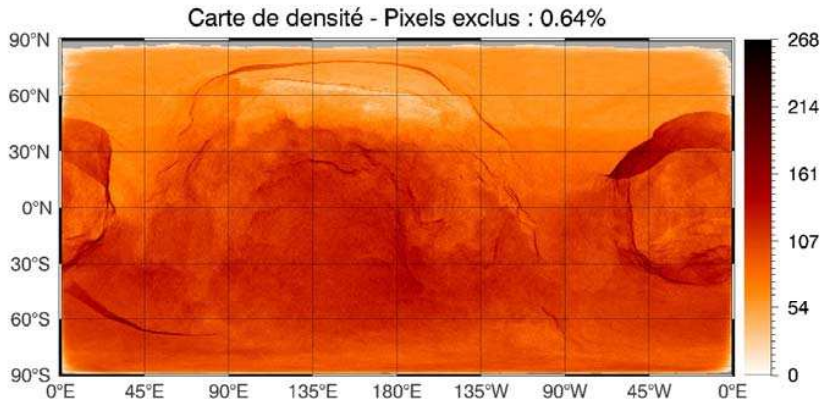

Carte de densité - Pixels exclus : 2.58%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
113.0
90.4
67.8
45.2
22.6
0.0

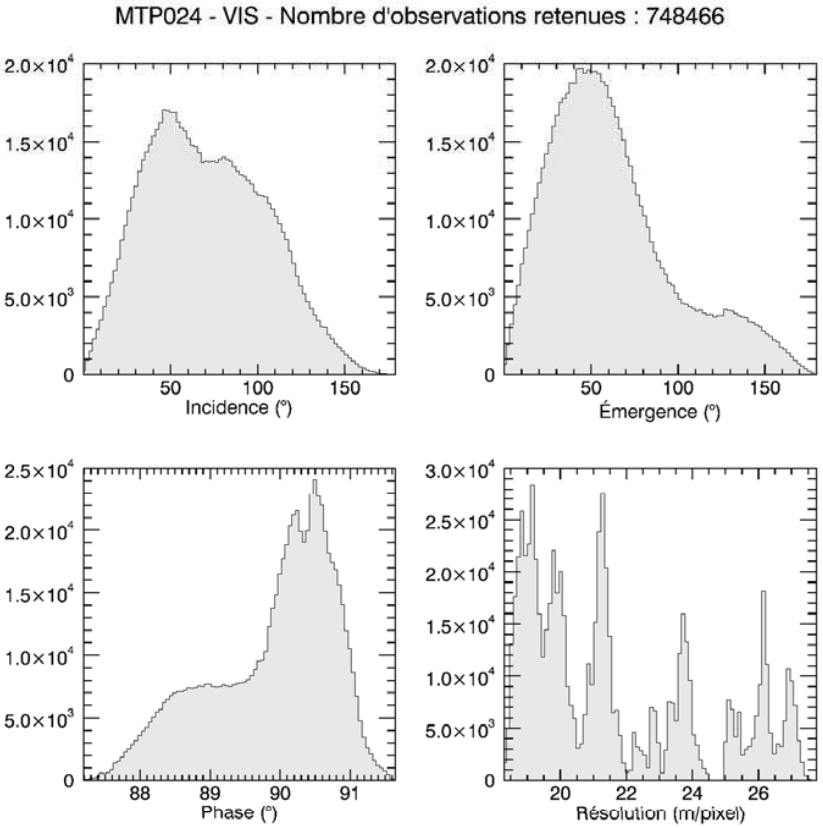

Carte de densité - Pixels exclus : 1.64%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
279
223
167
112
56
0

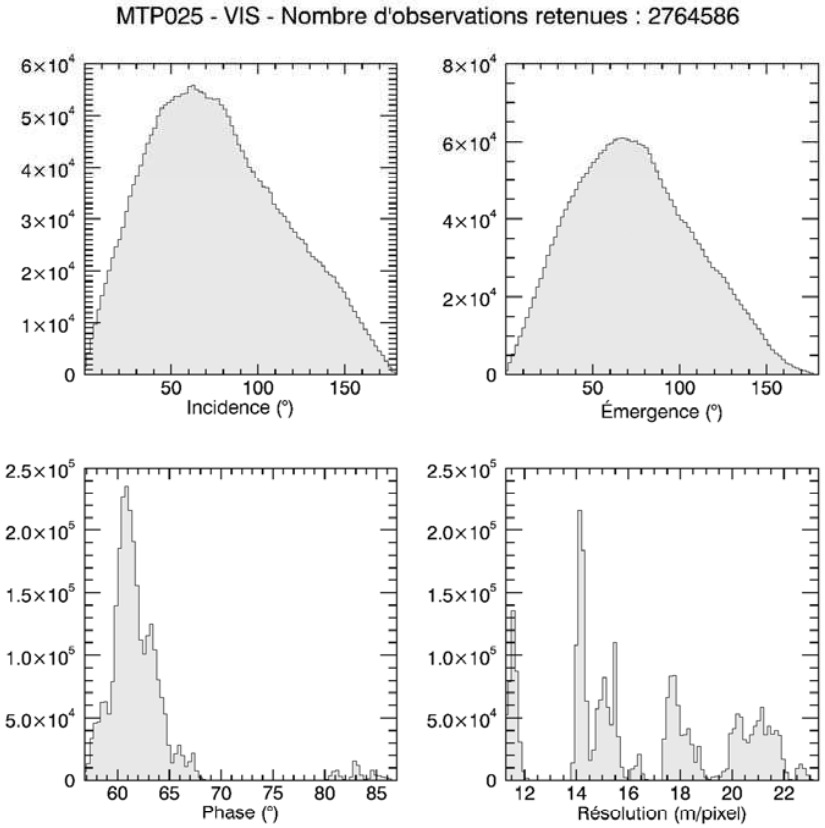

MTP022 - VIS - Nombre d'observations retenues : 294951
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

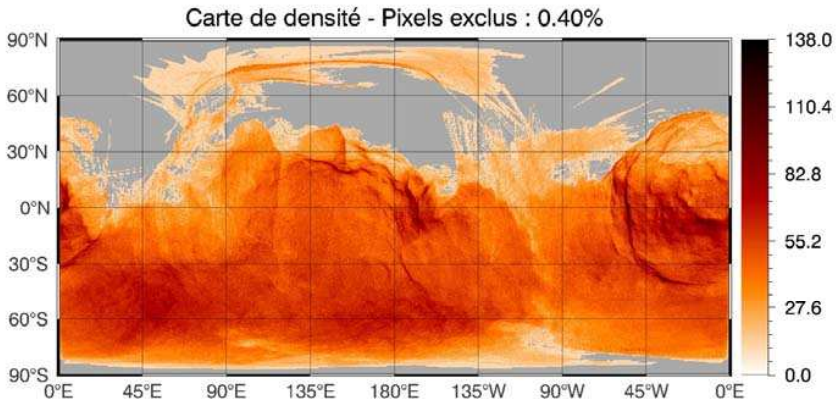

MTP023 - VIS - Nombre d'observations retenues : 1028908
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

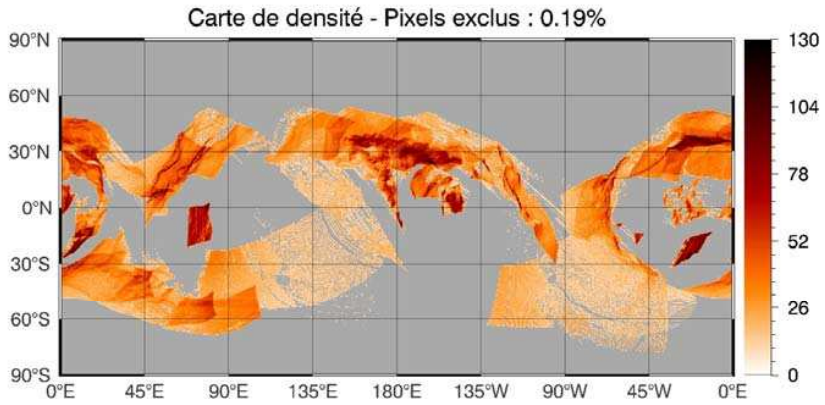

Carte de densité - Pixels exclus : 1.20%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
166
133
100
66
33
0

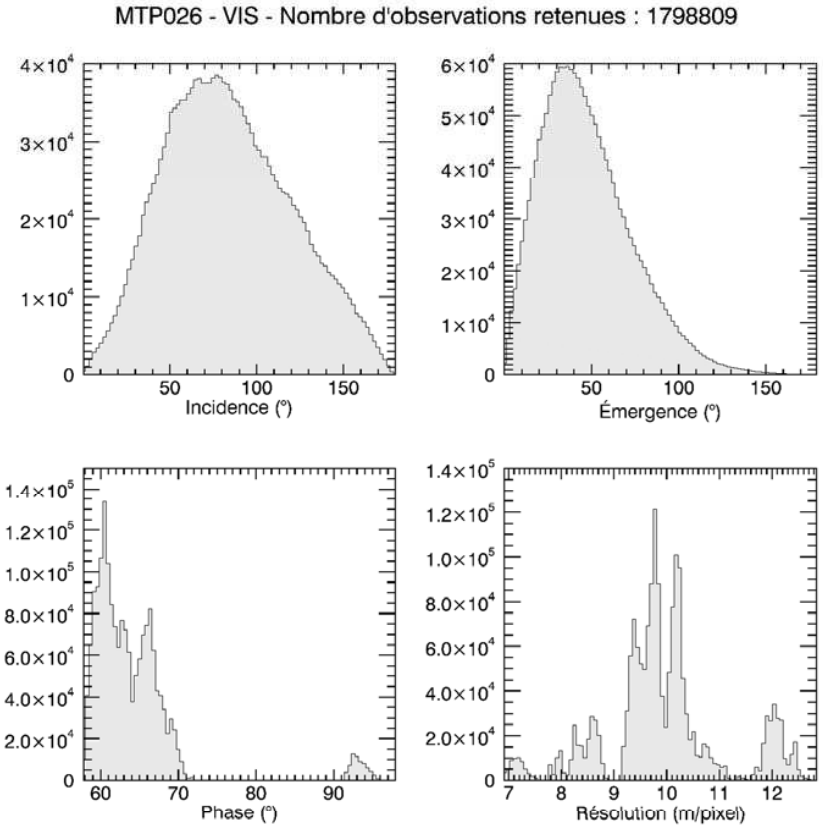

Carte de densité - Pixels exclus : 0.64%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
268
214
161
107
54
0

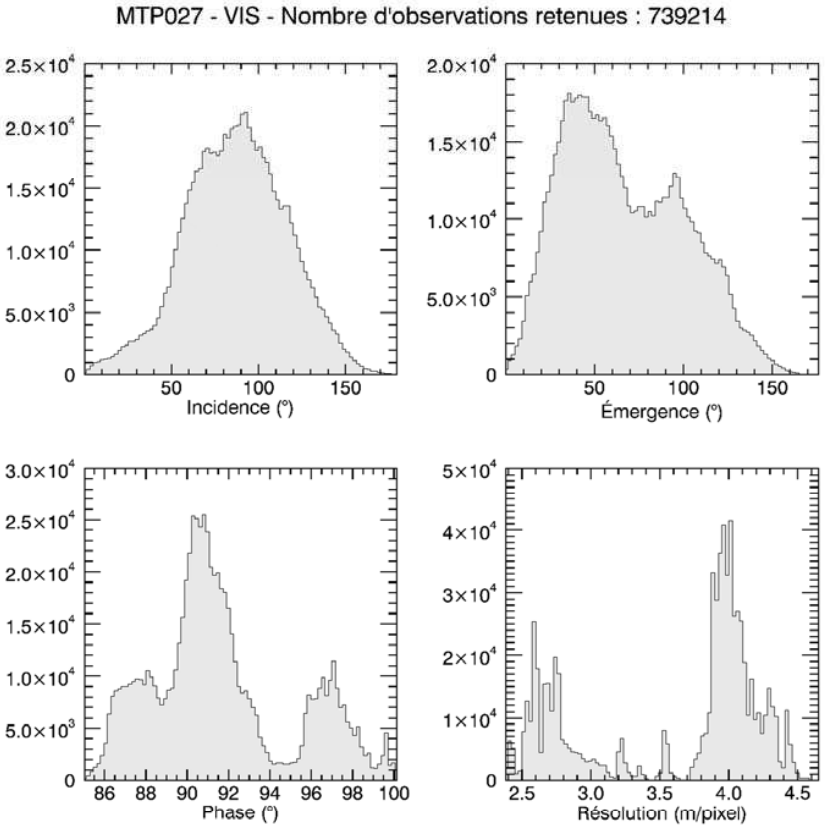

MTP024 - VIS - Nombre d'observations retenues : 748466
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

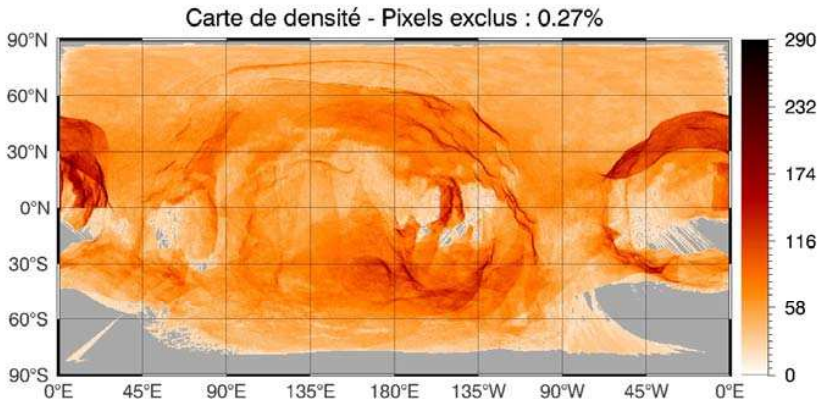

MTP025 - VIS - Nombre d'observations retenues : 2764586
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

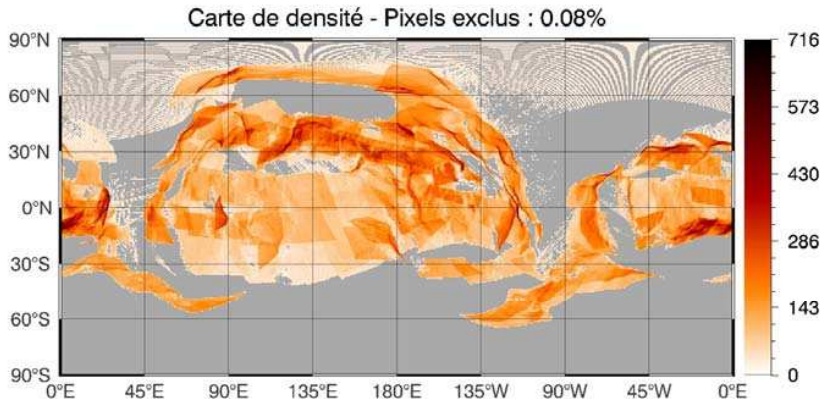

Carte de densité - Pixels exclus : 0.40%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
138.0
110.4
82.8
55.2
27.6
0.0

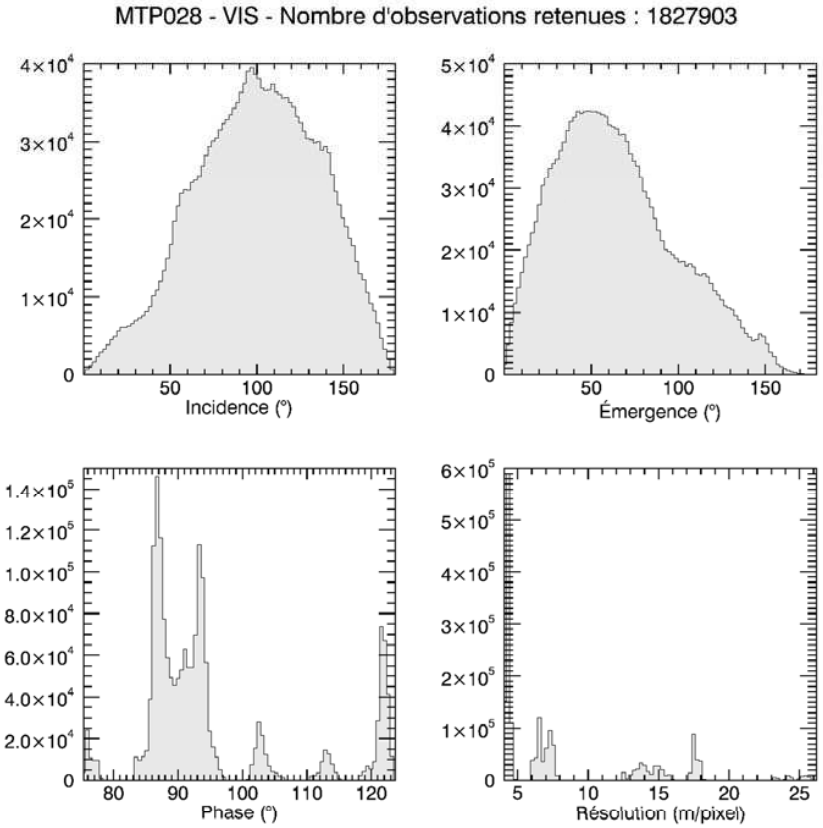

Carte de densité - Pixels exclus : 0.19%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
130
104
78
52
26
0

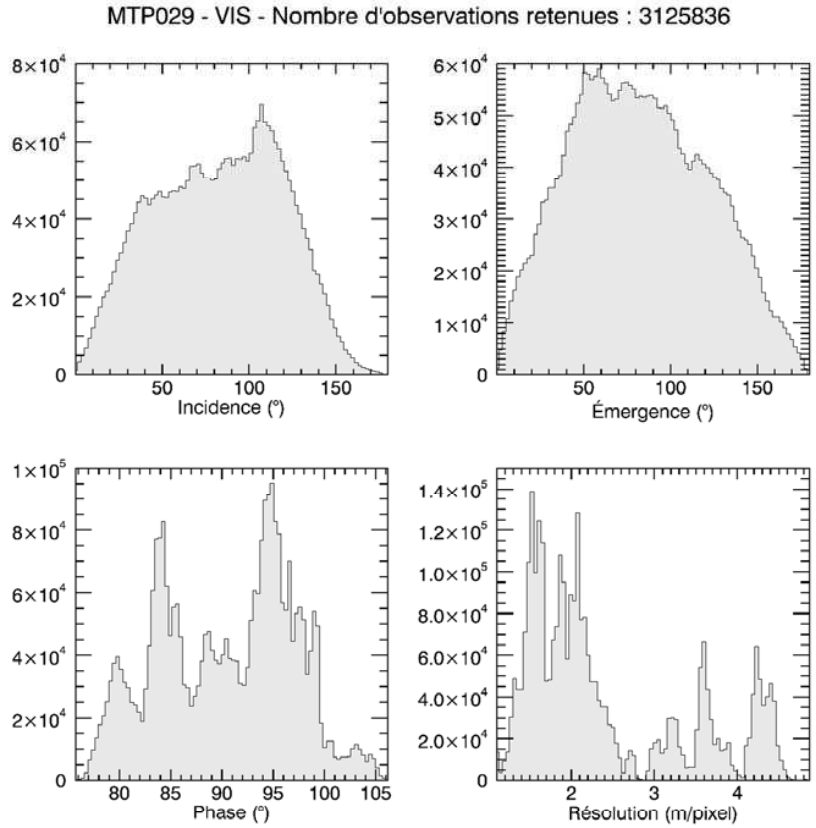

MTP026 - VIS - Nombre d'observations retenues : 1798809
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

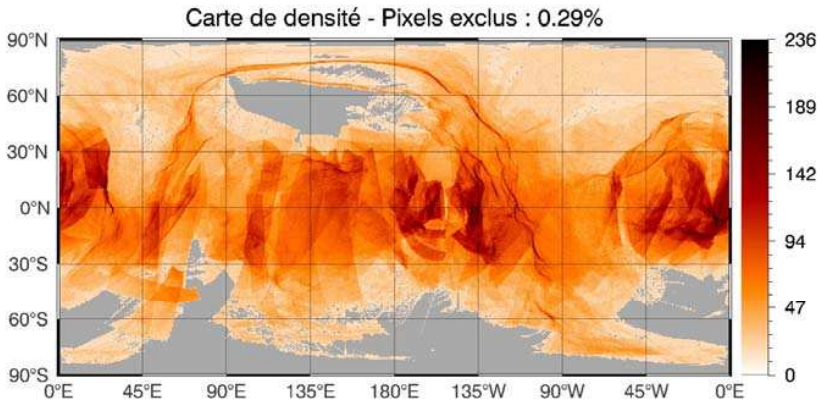

MTP027 - VIS - Nombre d'observations retenues : 739214
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

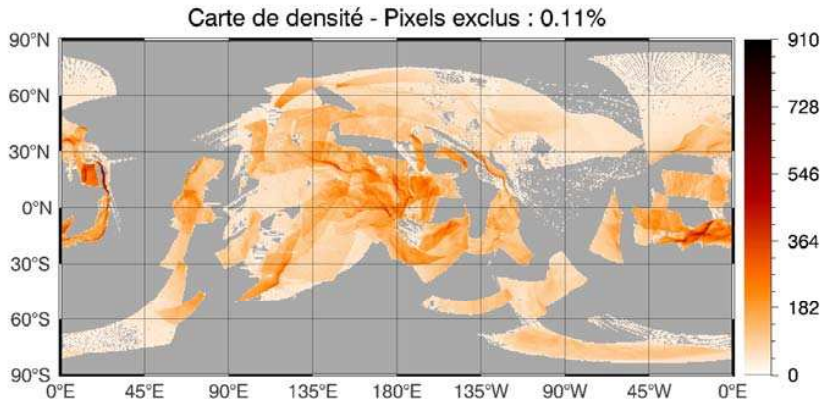

Carte de densité - Pixels exclus : 0.27%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
290
232
174
116
58
0

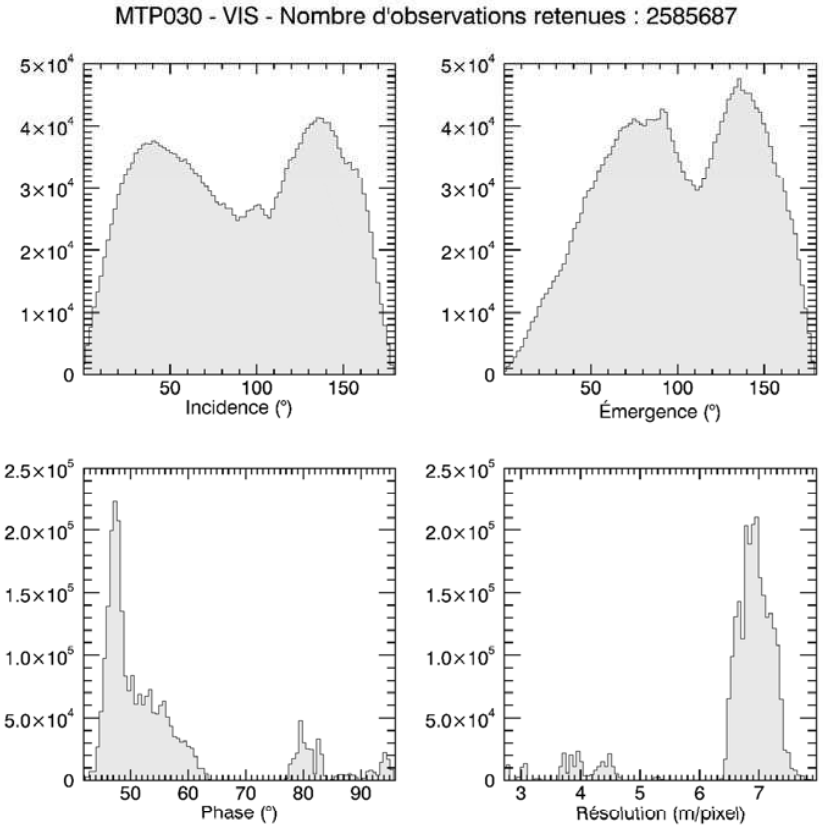

Carte de densité - Pixels exclus : 0.08%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
716
573
430
286
143
0

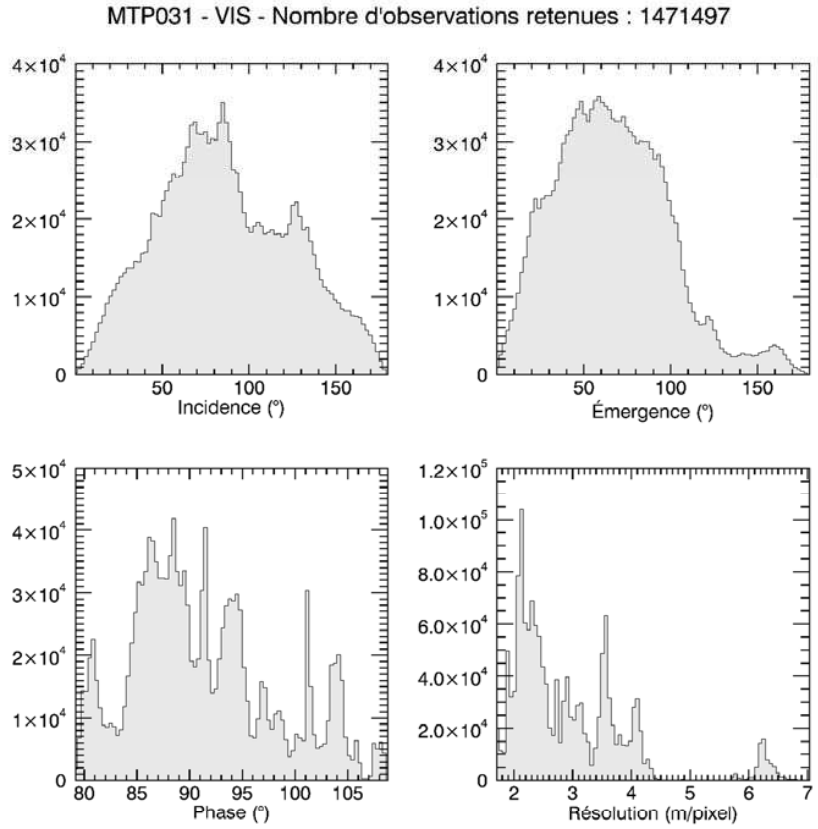

MTP028 - VIS - Nombre d'observations retenues : 1827903
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

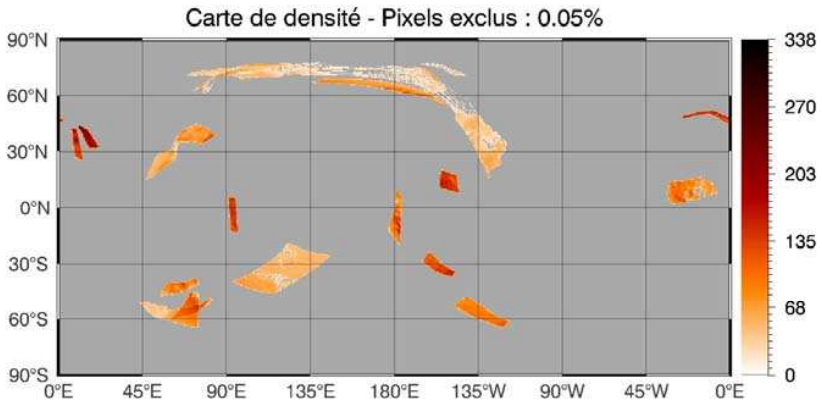

MTP029 - VIS - Nombre d'observations retenues : 3125836
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

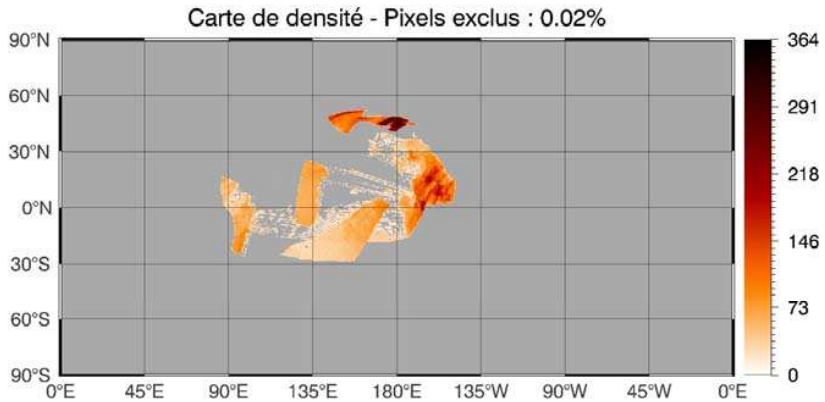

Carte de densité - Pixels exclus : 0.29%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
236
189
142
94
47
0

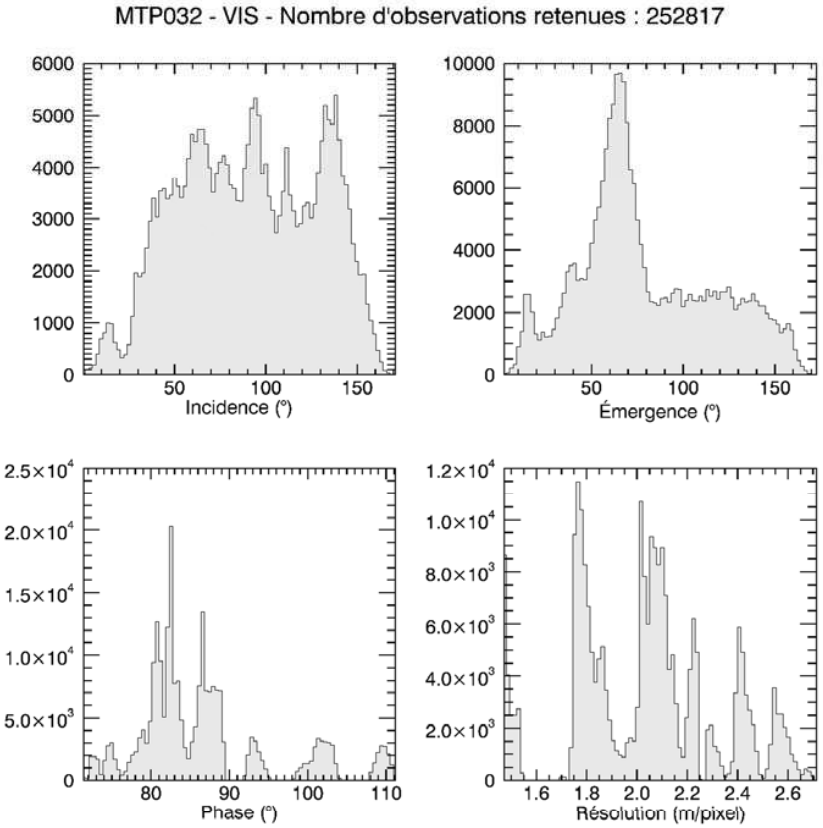

Carte de densité - Pixels exclus : 0.11%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
910
728
546
364
182
0

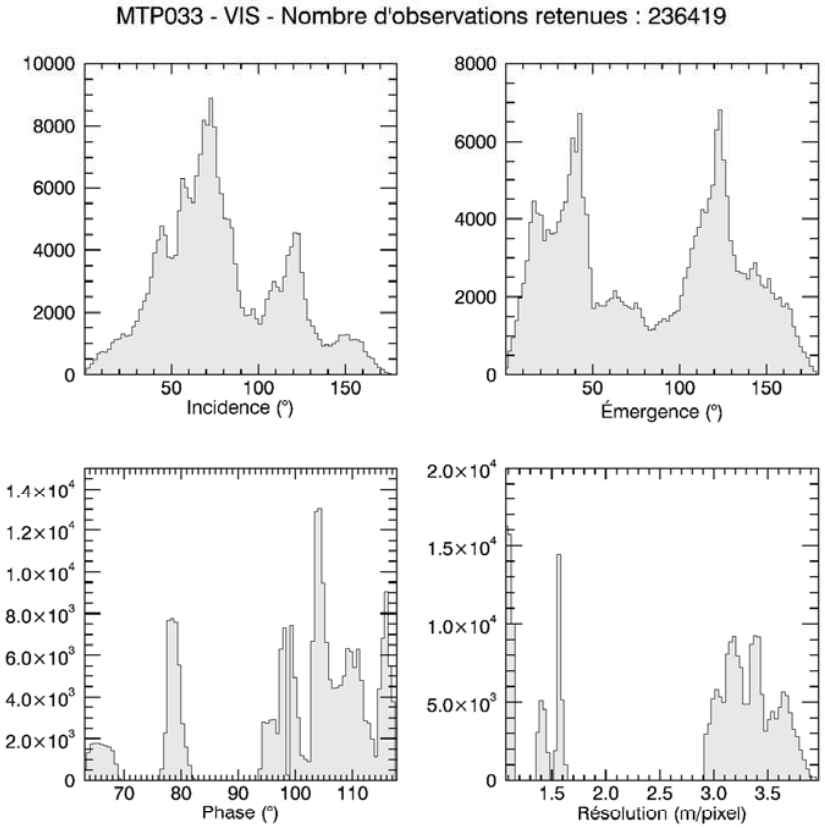

MTP030 - VIS - Nombre d'observations retenues : 2585687
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

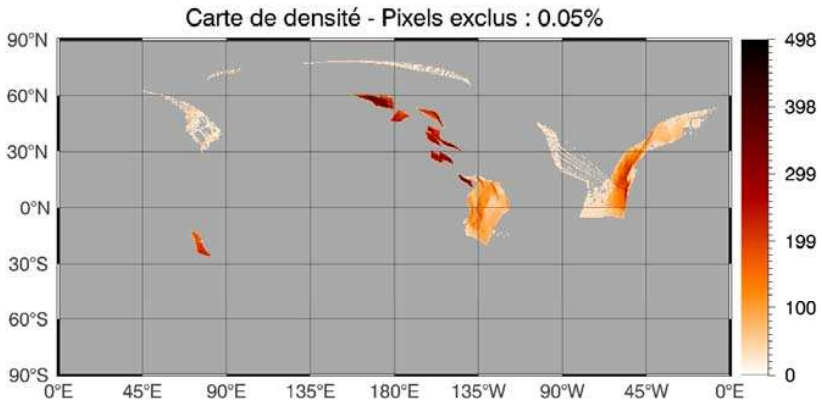

MTP031 - VIS - Nombre d'observations retenues : 1471497
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

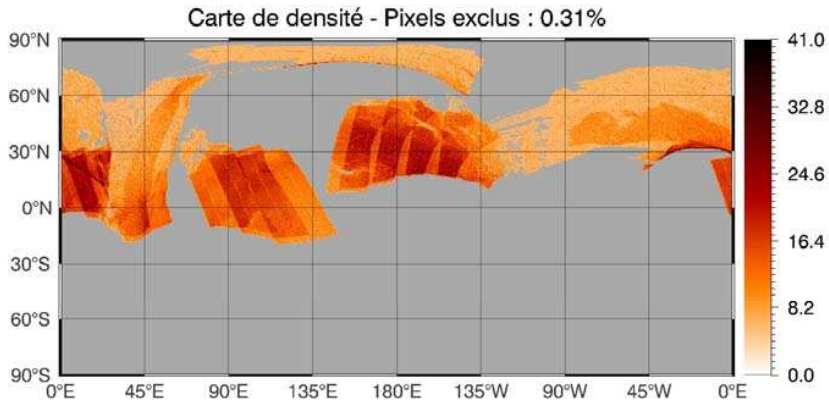

Carte de densité - Pixels exclus : 0.05%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
338
270
203
135
68
0

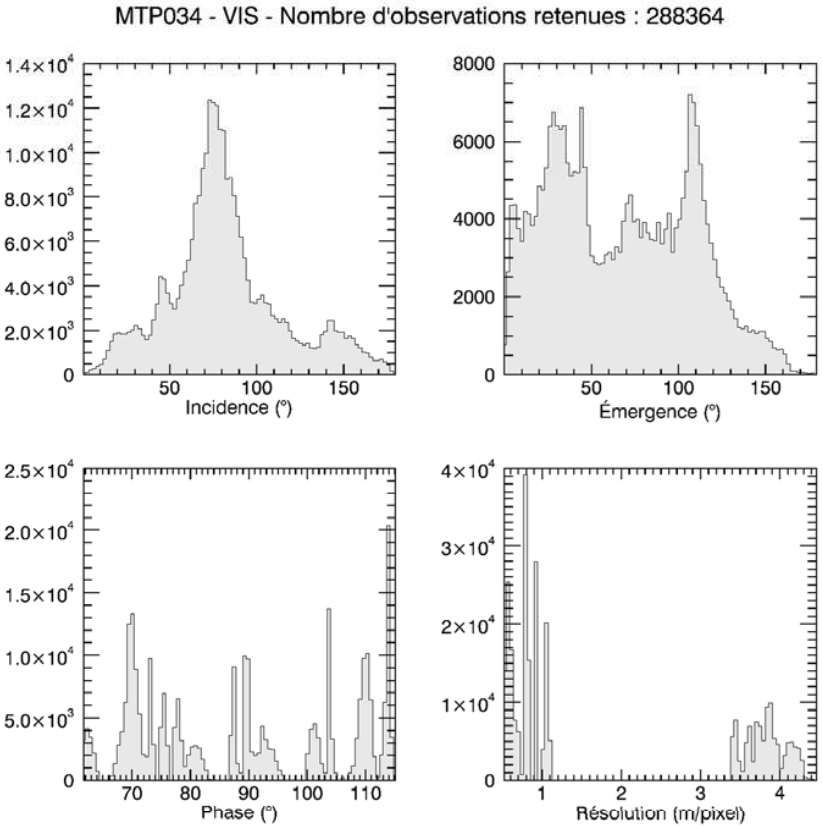

Carte de densité - Pixels exclus : 0.02%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
364
291
218
146
73
0

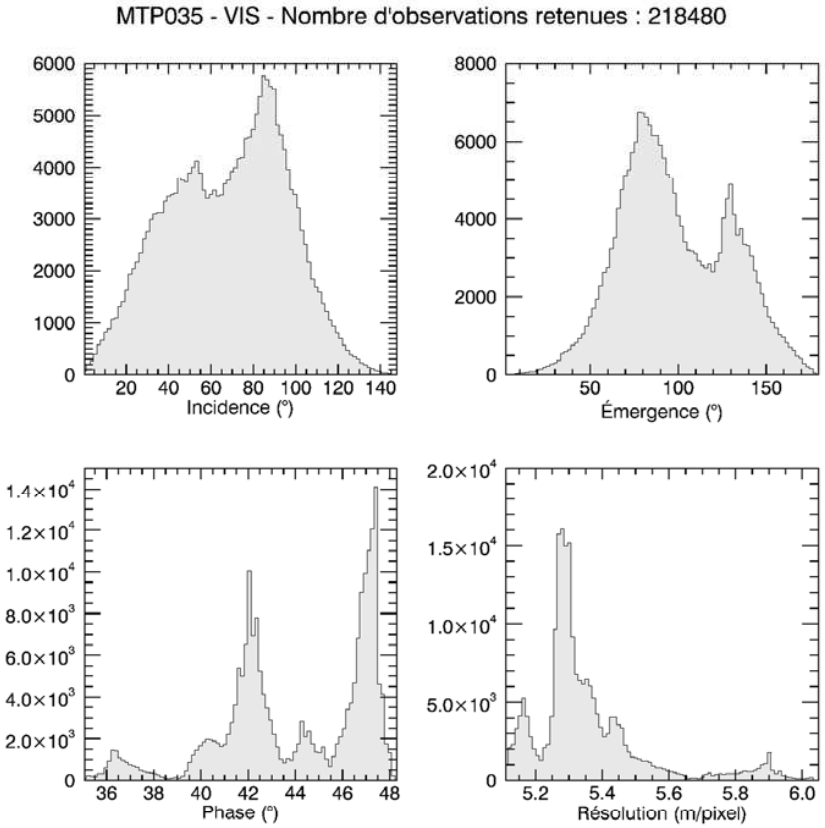

MTP032 - VIS - Nombre d'observations retenues : 252817
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

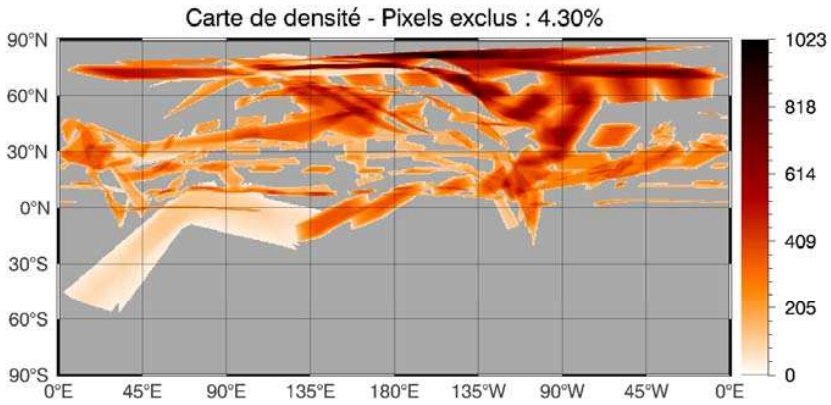

MTP033 - VIS - Nombre d'observations retenues : 236419
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

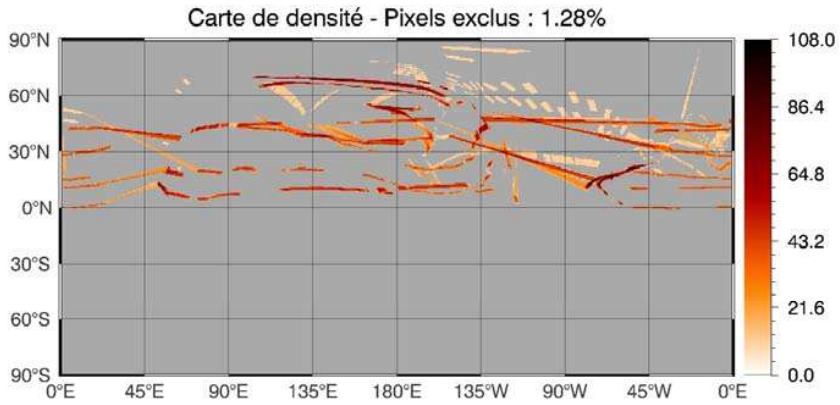

Carte de densité - Pixels exclus : 0.05%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
498
398
299
199
100
0

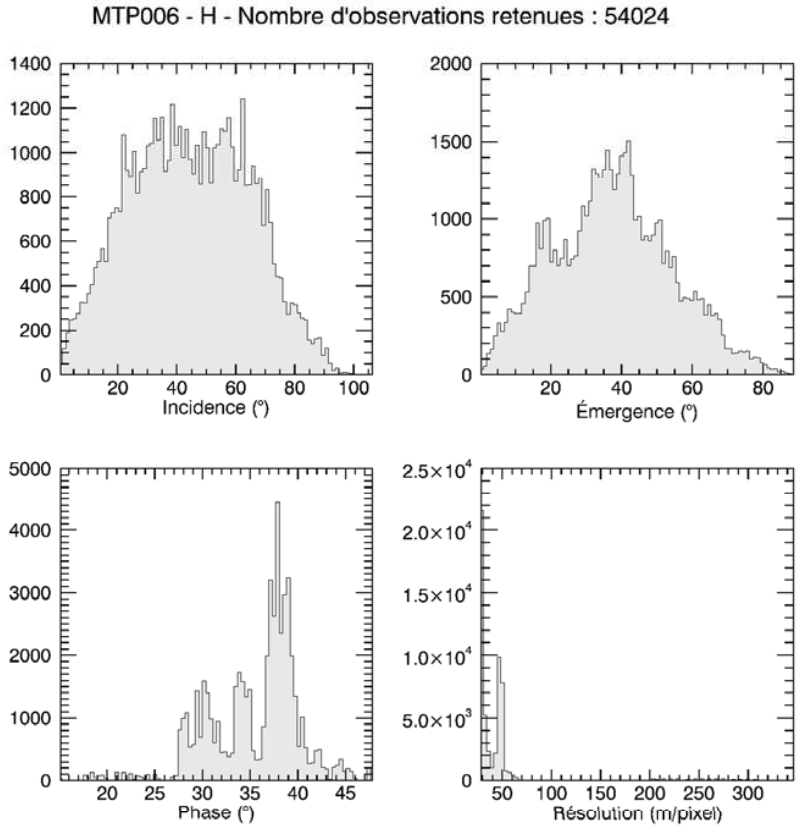

Carte de densité - Pixels exclus : 0.31%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
41.0
32.8
24.6
16.4
8.2
0.0

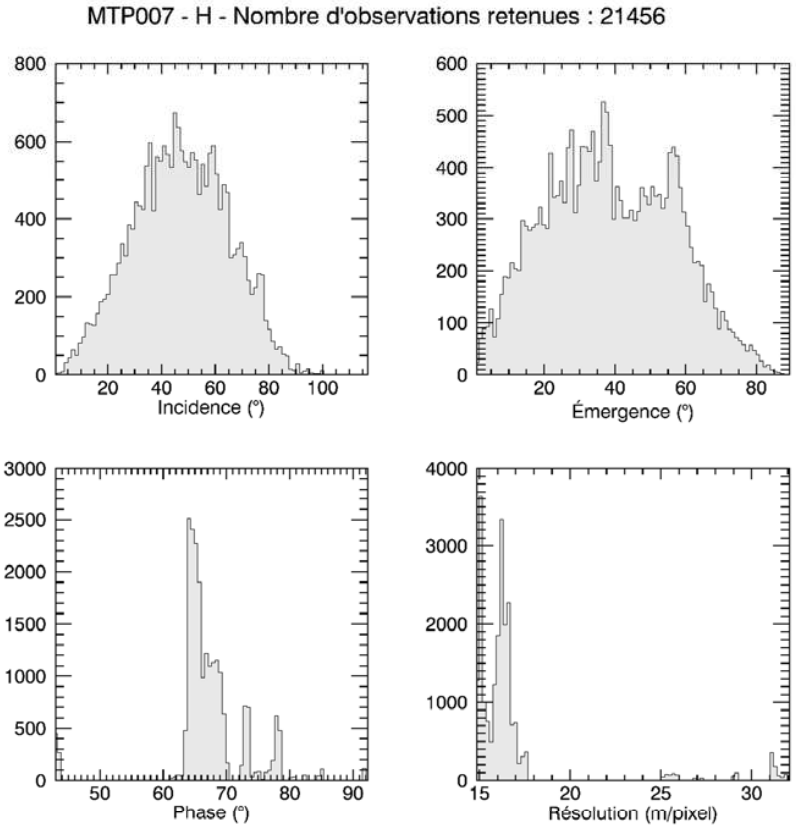

MTP034 - VIS - Nombre d'observations retenues : 288364
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

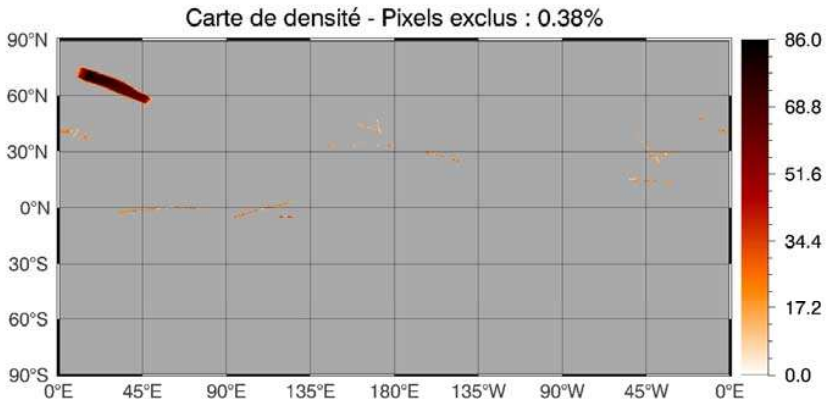

MTP035 - VIS - Nombre d'observations retenues : 218480
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

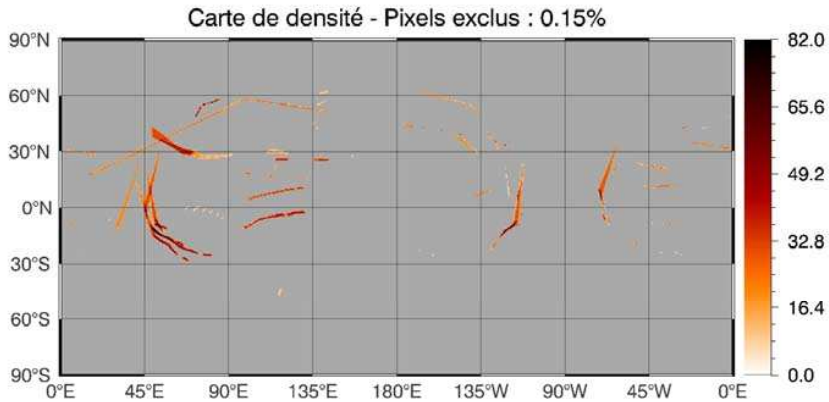

Carte de densité - Pixels exclus : 4.30%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
1023
818
614
409
205
0

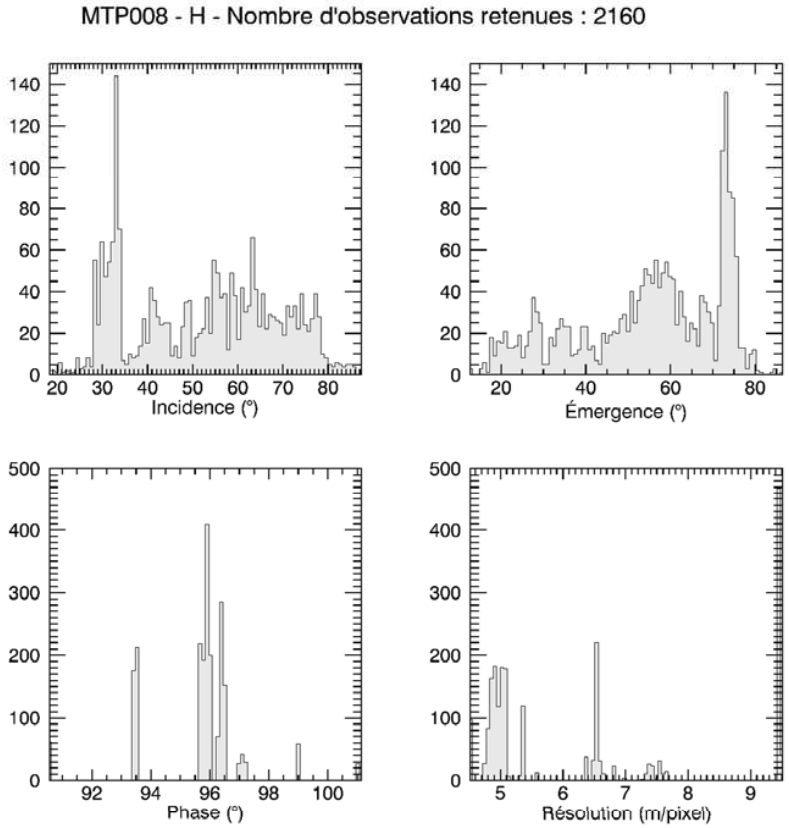

Carte de densité - Pixels exclus : 1.28%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
108.0
86.4
64.8
43.2
21.6
0.0

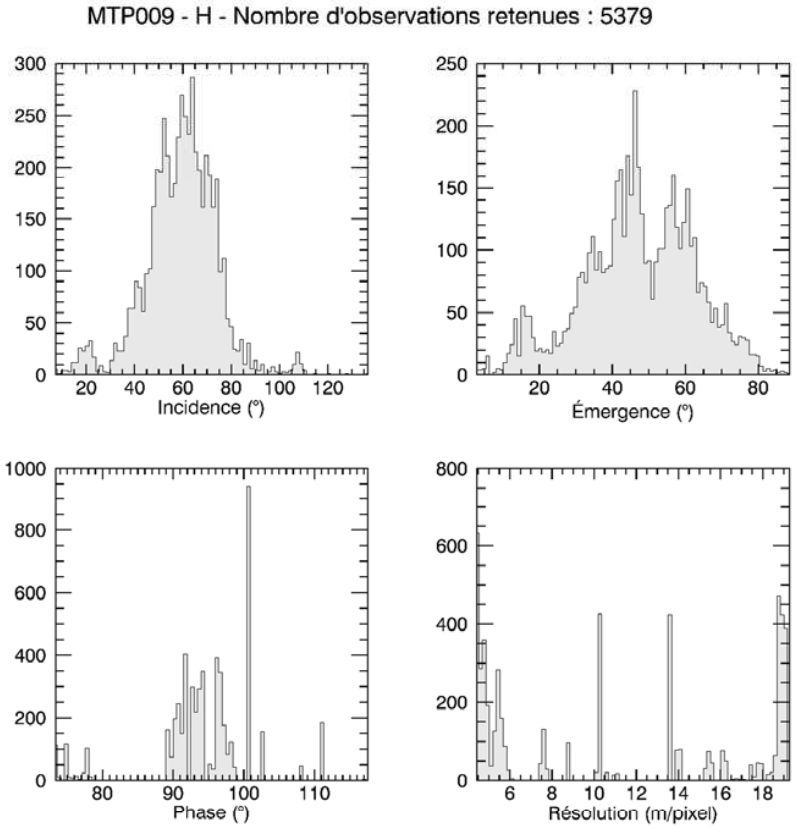

MTP006 - H - Nombre d'observations retenues : 54024
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

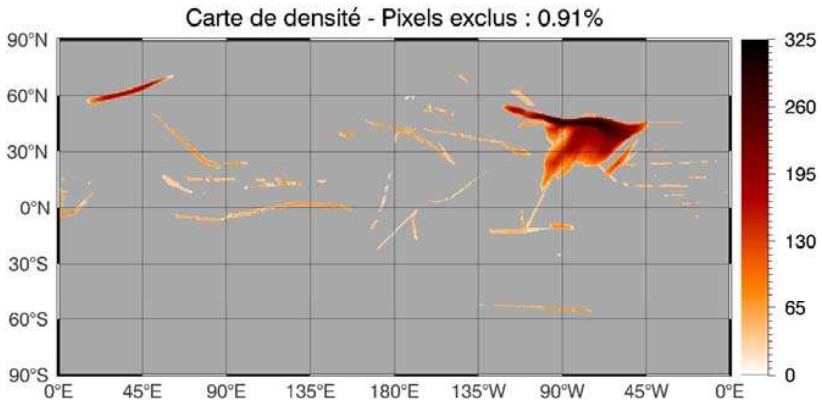

MTP007 - H - Nombre d'observations retenues : 21456
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

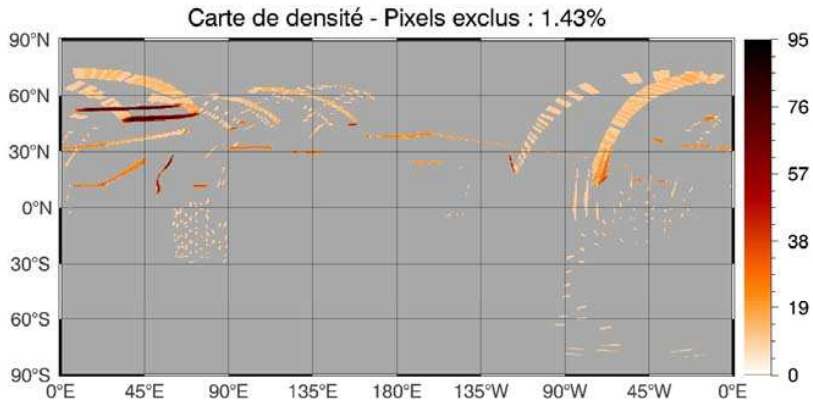

Carte de densité - Pixels exclus : 0.38%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
86.0
68.8
51.6
34.4
17.2
0.0

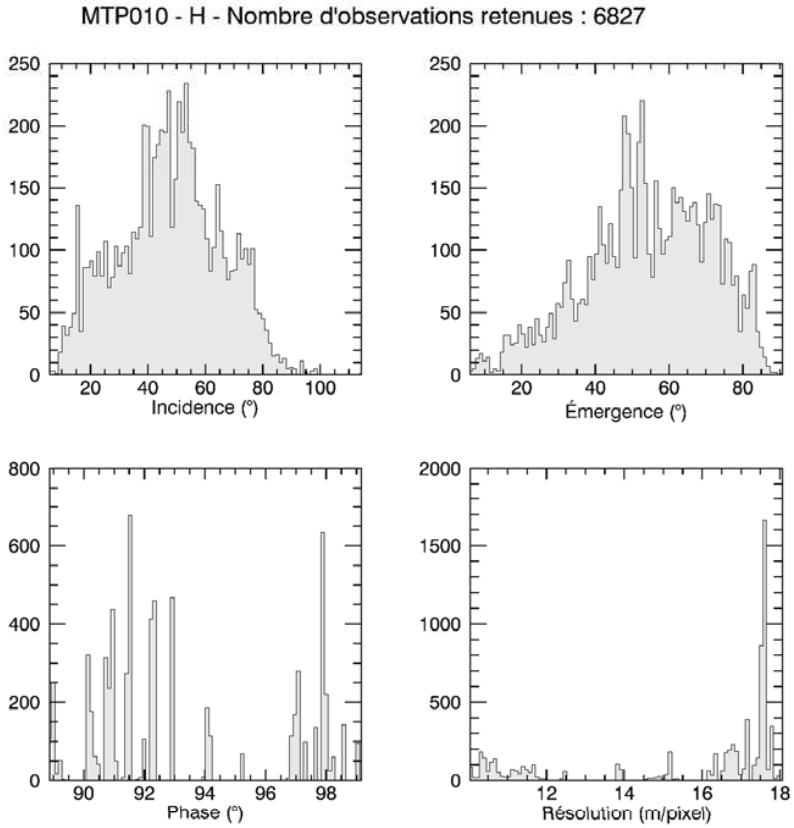

Carte de densité - Pixels exclus : 0.15%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
82.0
65.6
49.2
32.8
16.4
0.0

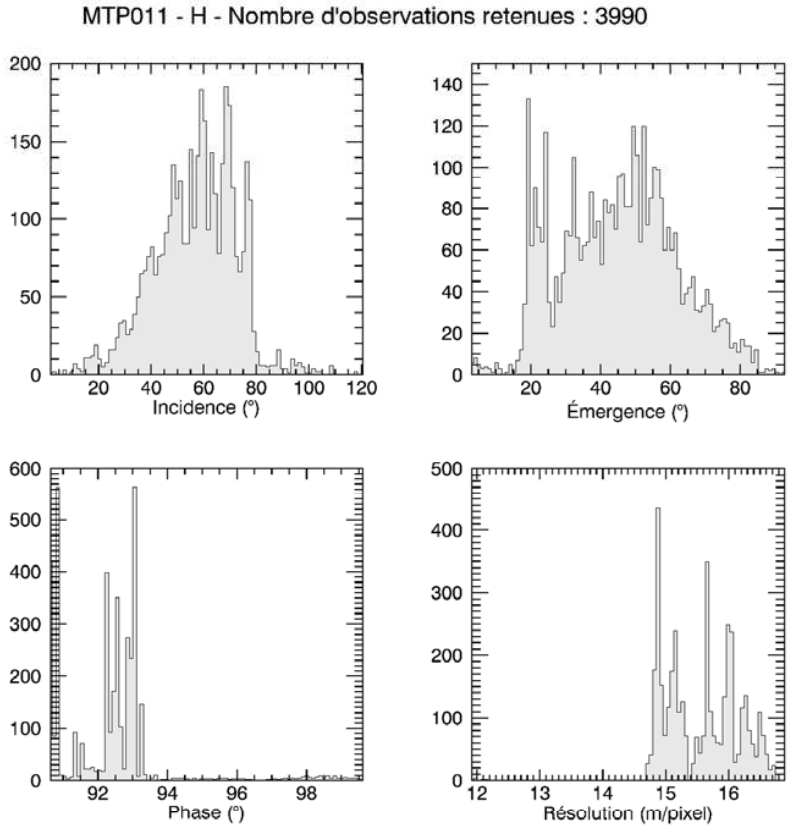

MTP008 - H - Nombre d'observations retenues : 2160
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

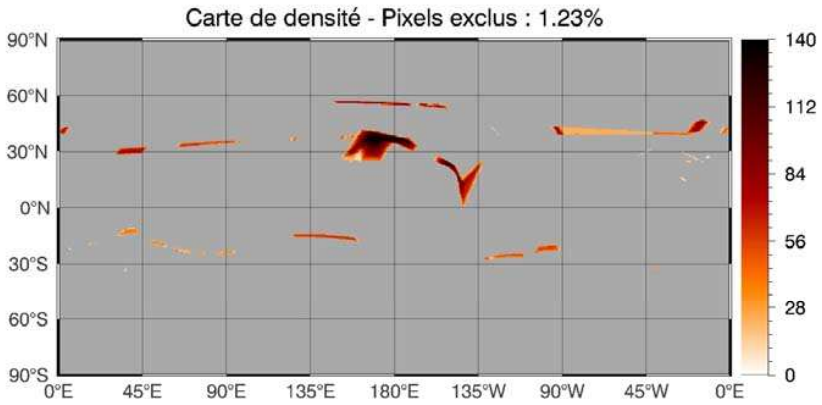

MTP009 - H - Nombre d'observations retenues : 5379
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

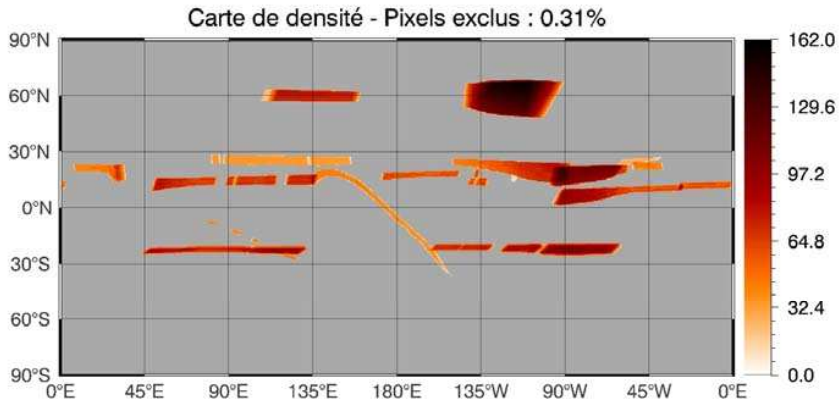

Carte de densité - Pixels exclus : 0.91%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
325
260
195
130
65
0

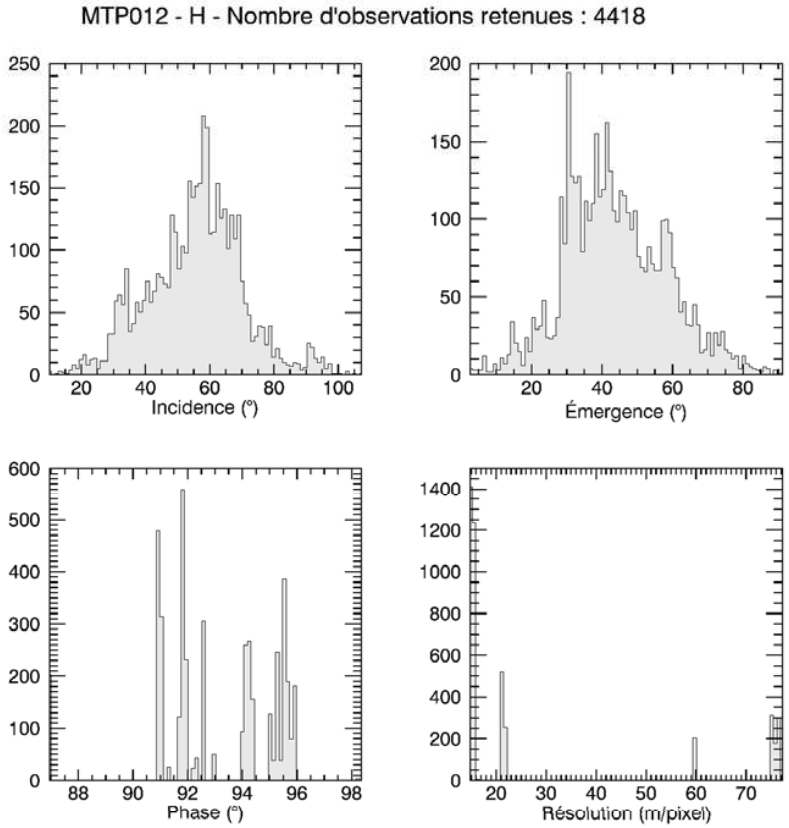

Carte de densité - Pixels exclus : 1.43%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
95
76
57
38
19
0

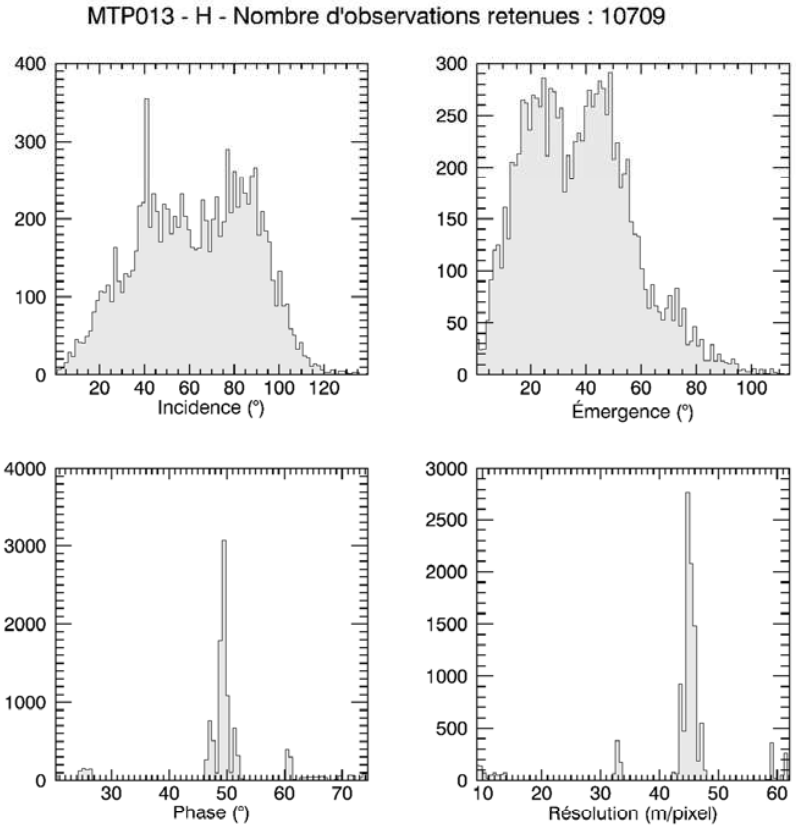

MTP010 - H - Nombre d'observations retenues : 6827
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

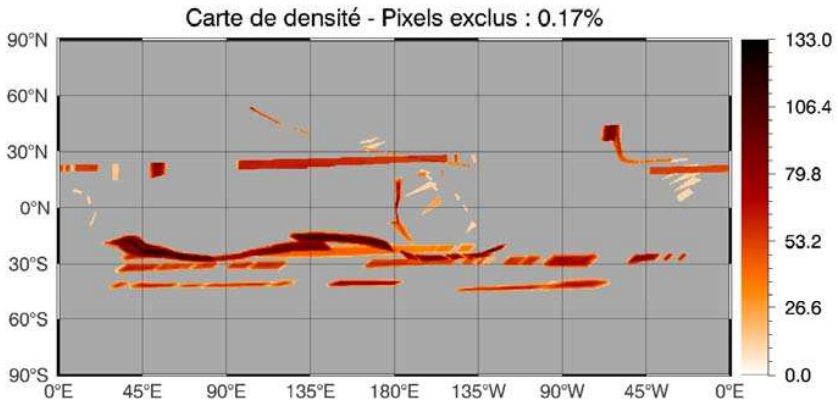

MTP011 - H - Nombre d'observations retenues : 3990
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

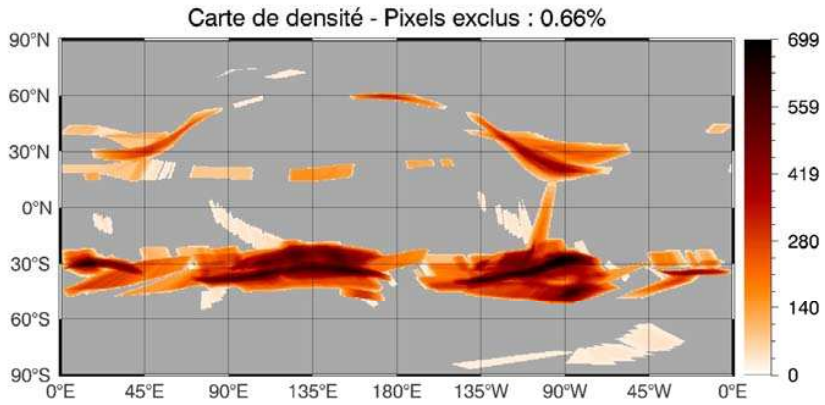

Carte de densité - Pixels exclus : 1.23%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
140
112
84
56
28
0

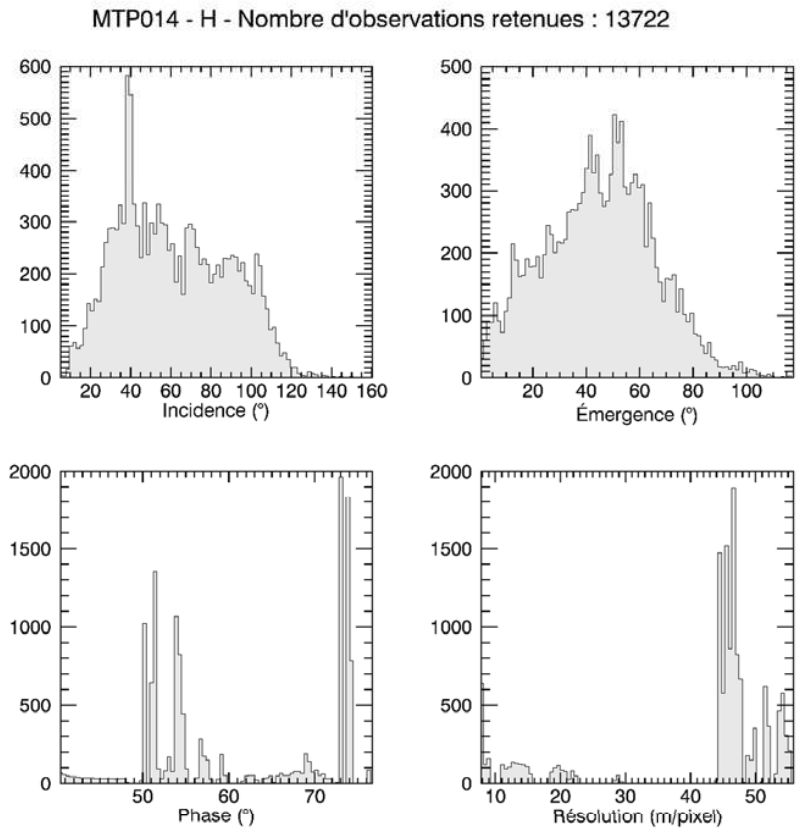

Carte de densité - Pixels exclus : 0.31%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
162.0
129.6
97.2
64.8
32.4
0.0

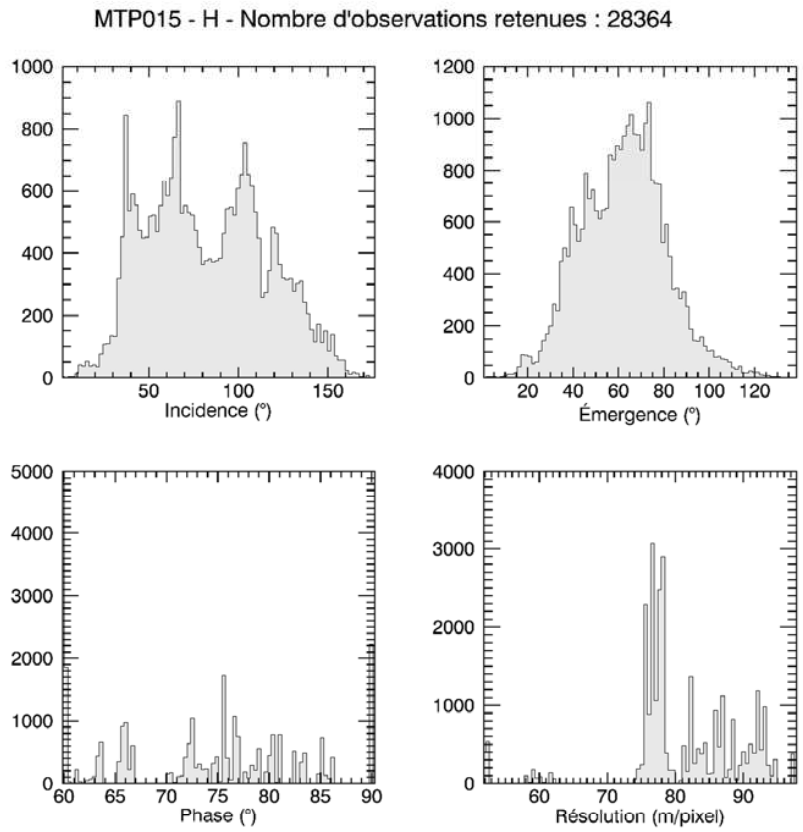

MTP012 - H - Nombre d'observations retenues : 4418
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

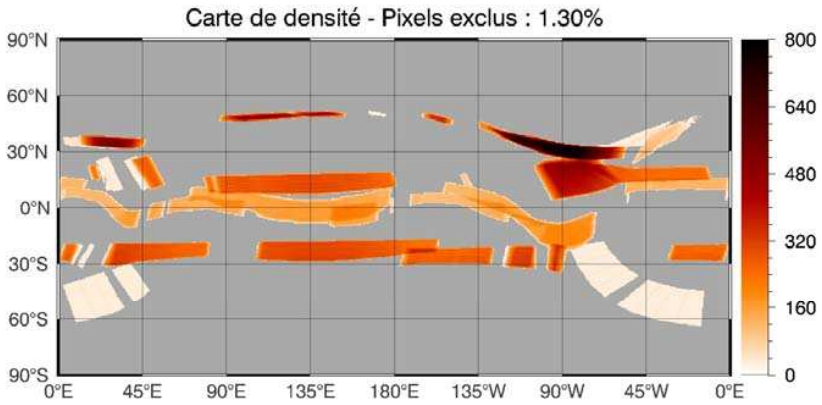

MTP013 - H - Nombre d'observations retenues : 10709
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

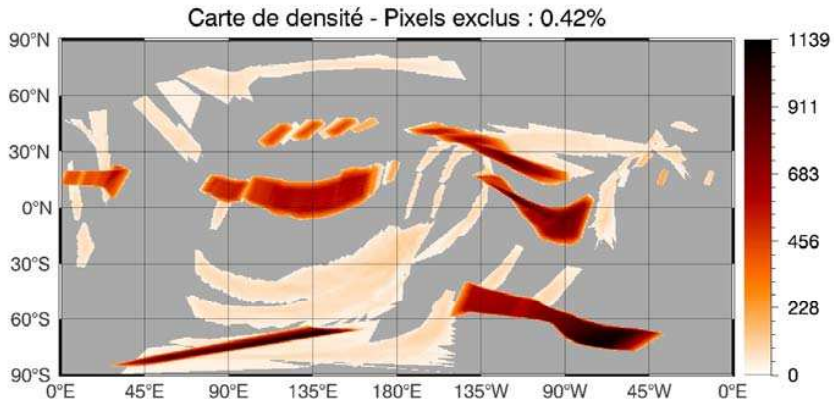

Carte de densité - Pixels exclus : 0.17%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
133.0
106.4
79.8
53.2
26.6
0.0

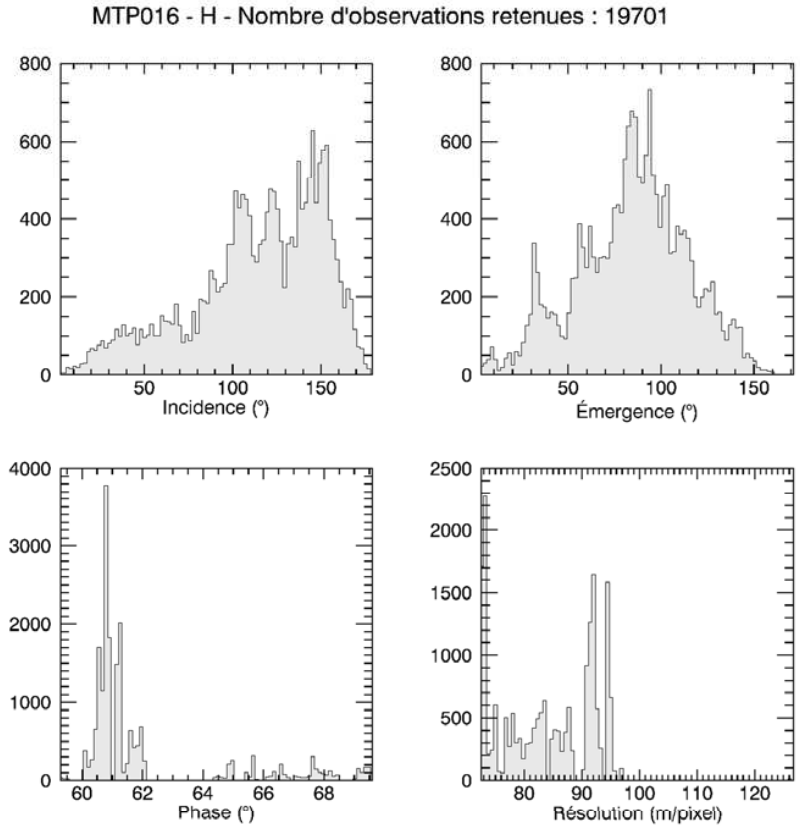

Carte de densité - Pixels exclus : 0.66%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
699
559
419
280
140
0

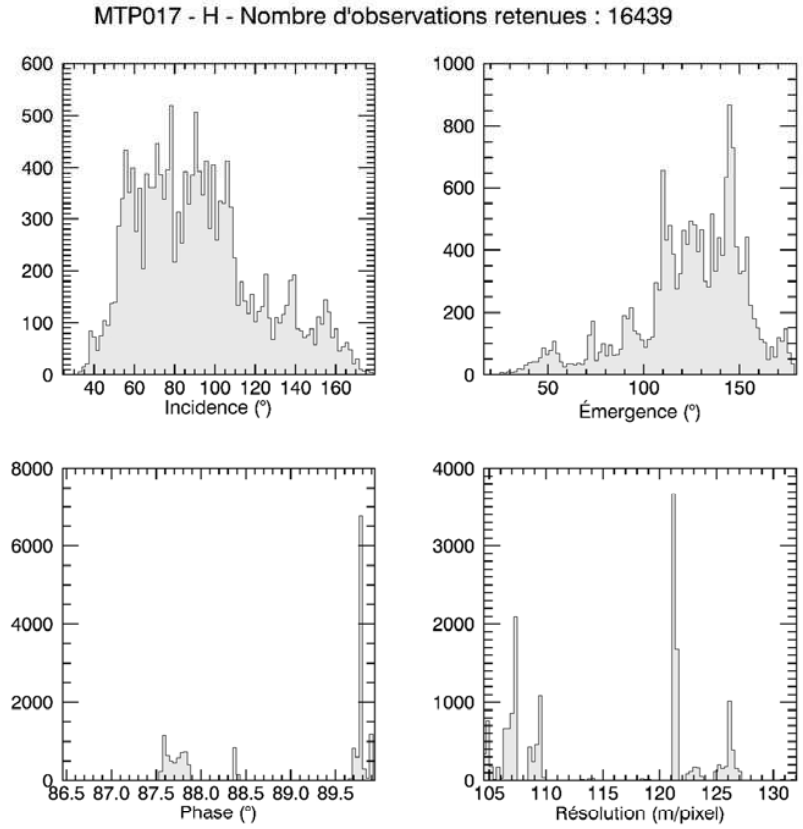

MTP014 - H - Nombre d'observations retenues : 13722
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

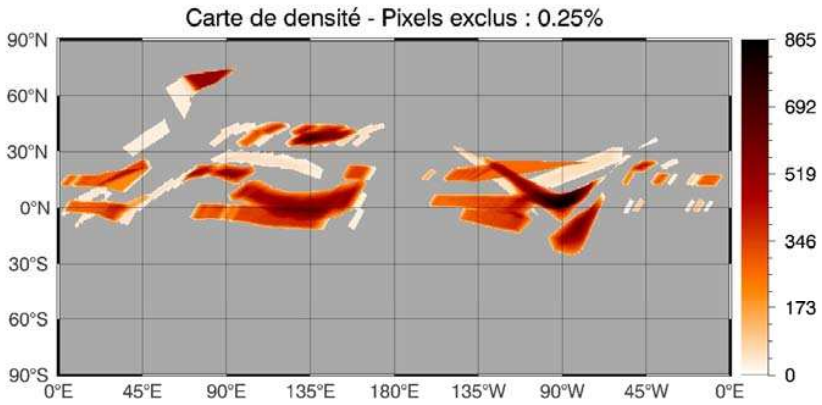

MTP015 - H - Nombre d'observations retenues : 28364
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

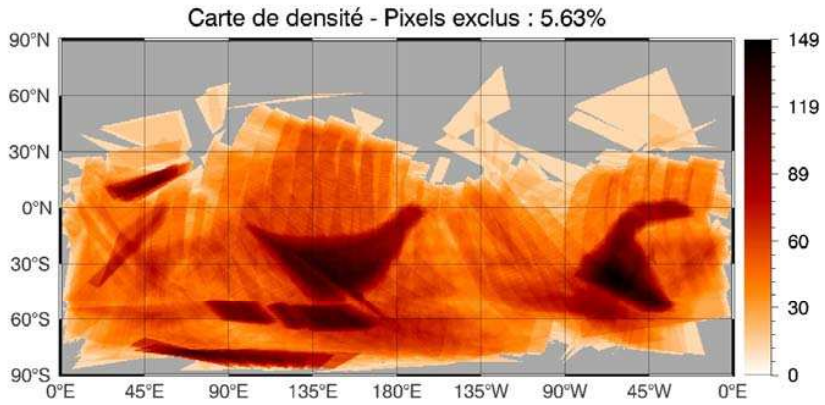

Carte de densité - Pixels exclus : 1.30%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
800
640
480
320
160
0

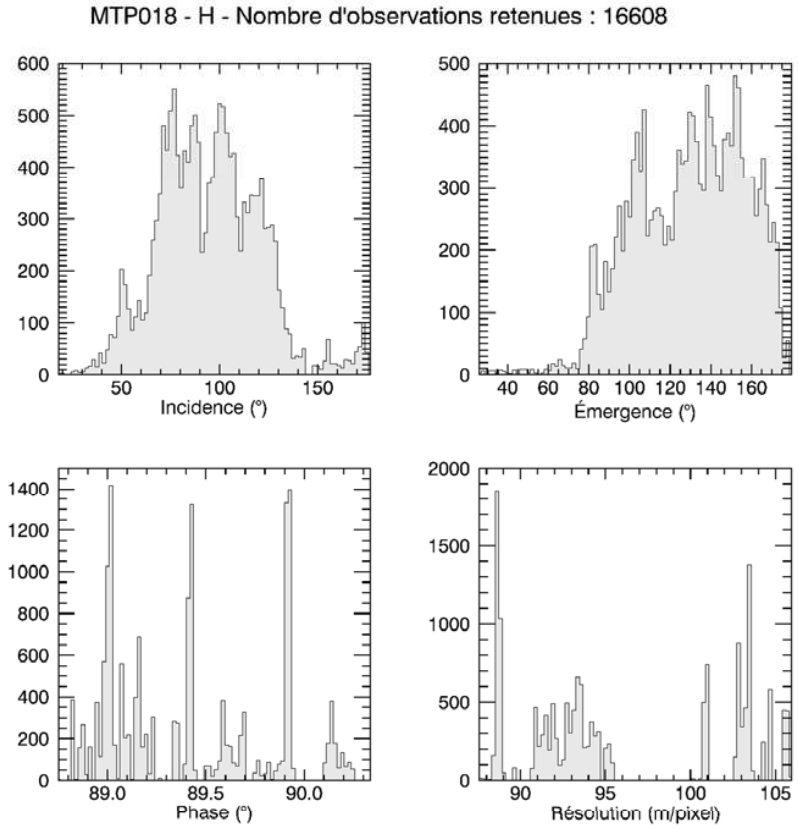

Carte de densité - Pixels exclus : 0.42%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
1139
911
683
456
228
0

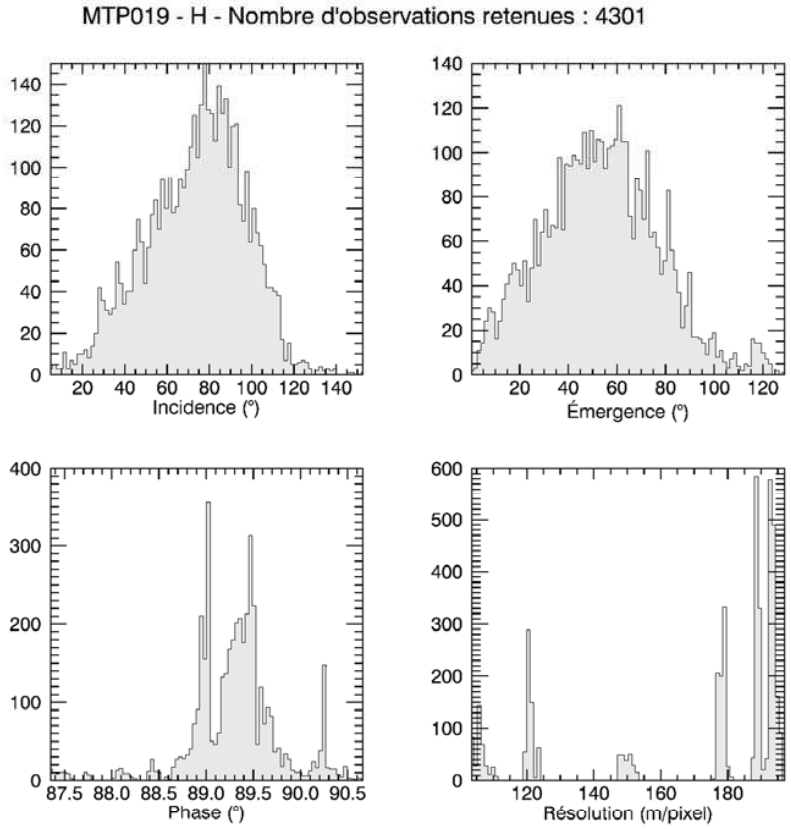

MTP016 - H - Nombre d'observations retenues : 19701
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

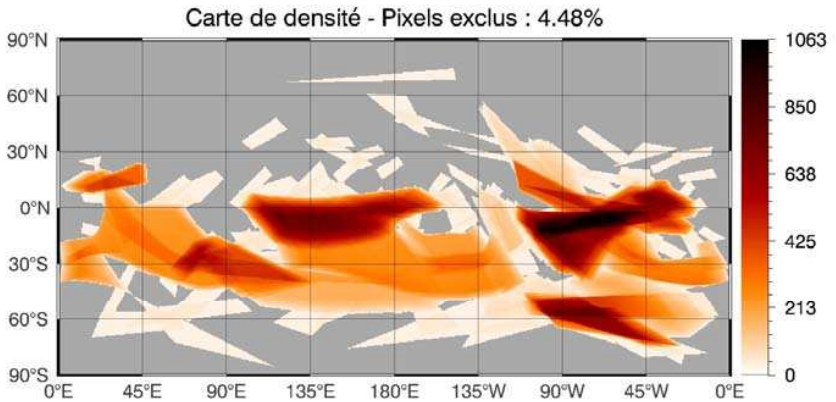

MTP017 - H - Nombre d'observations retenues : 16439
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

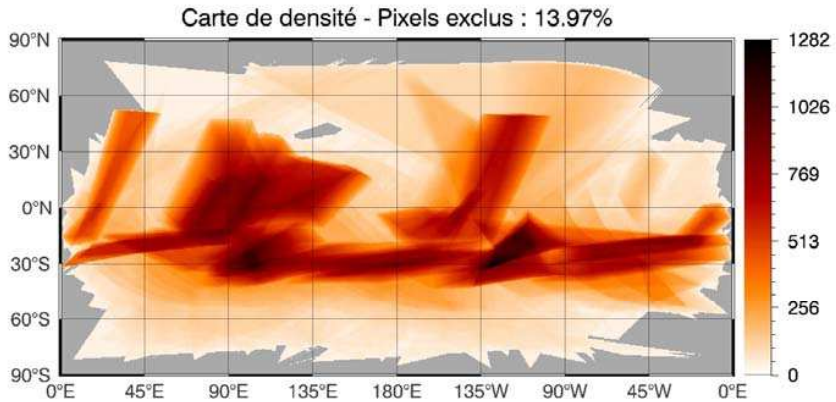

Carte de densité - Pixels exclus : 0.25%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
865
692
519
346
173
0

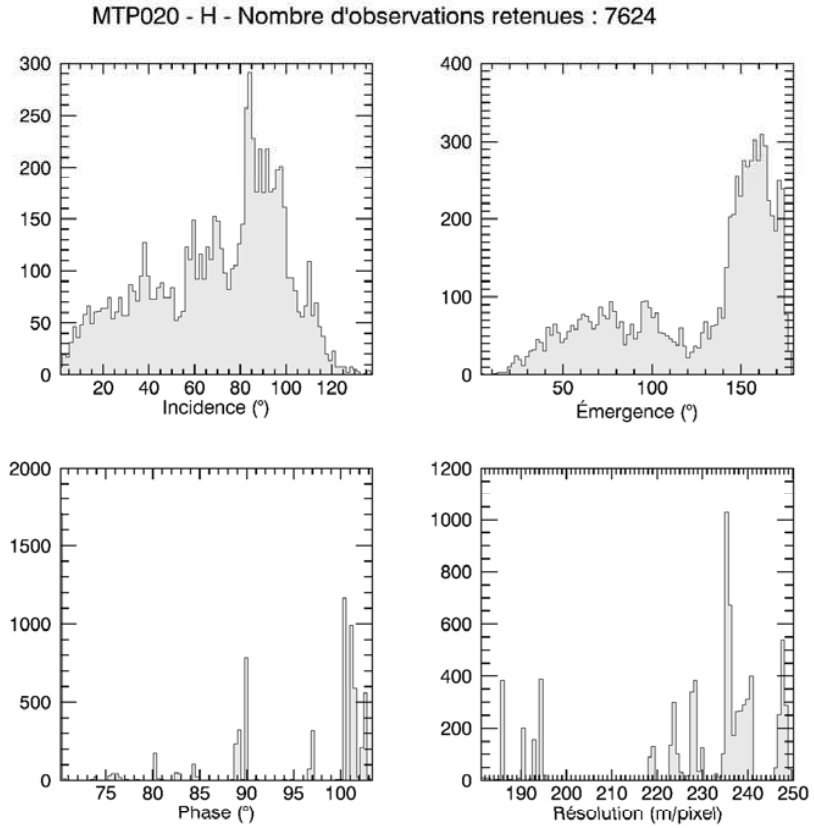

Carte de densité - Pixels exclus : 5.63%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
149
119
89
60
30
0

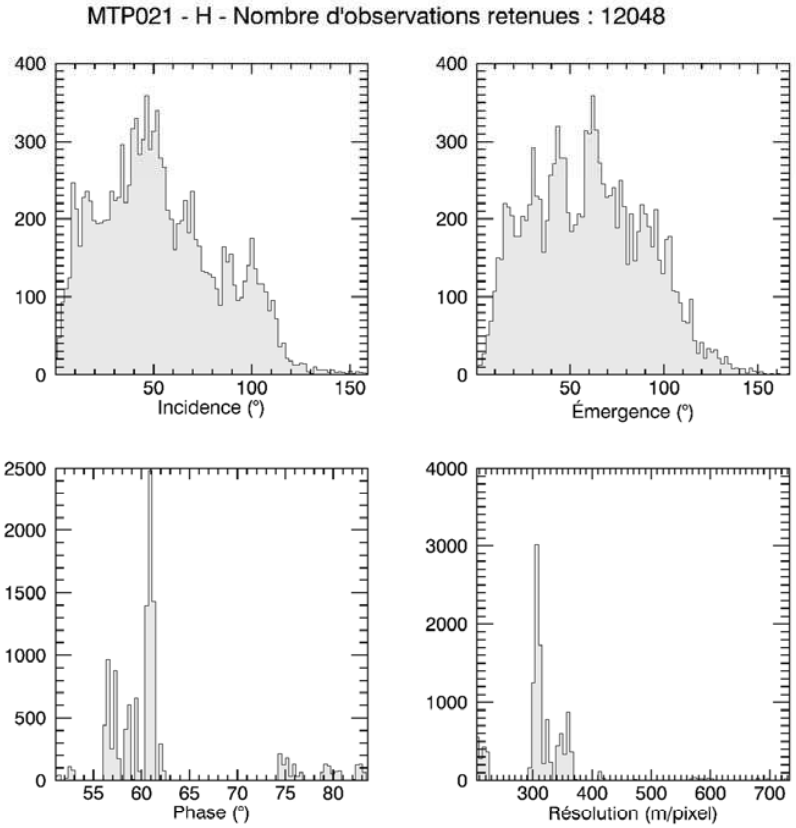

MTP018 - H - Nombre d'observations retenues : 16608
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

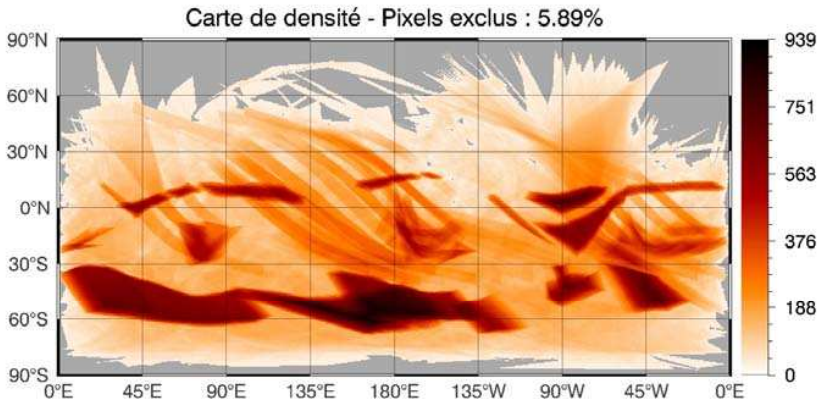

MTP019 - H - Nombre d'observations retenues : 4301
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

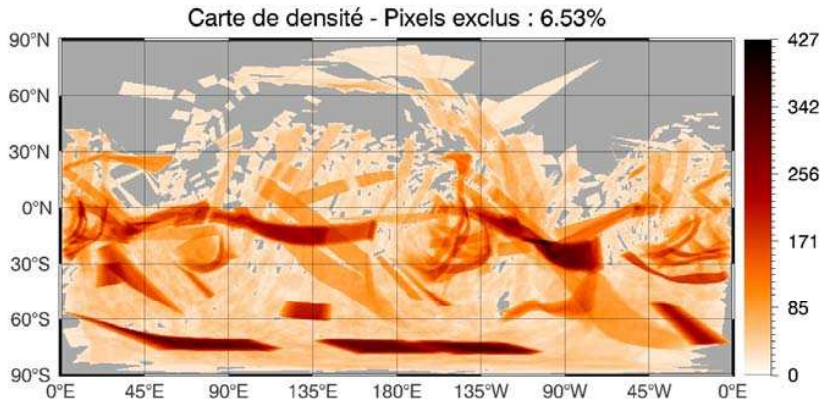

Carte de densité - Pixels exclus : 4.48%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
1063
850
638
425
213
0

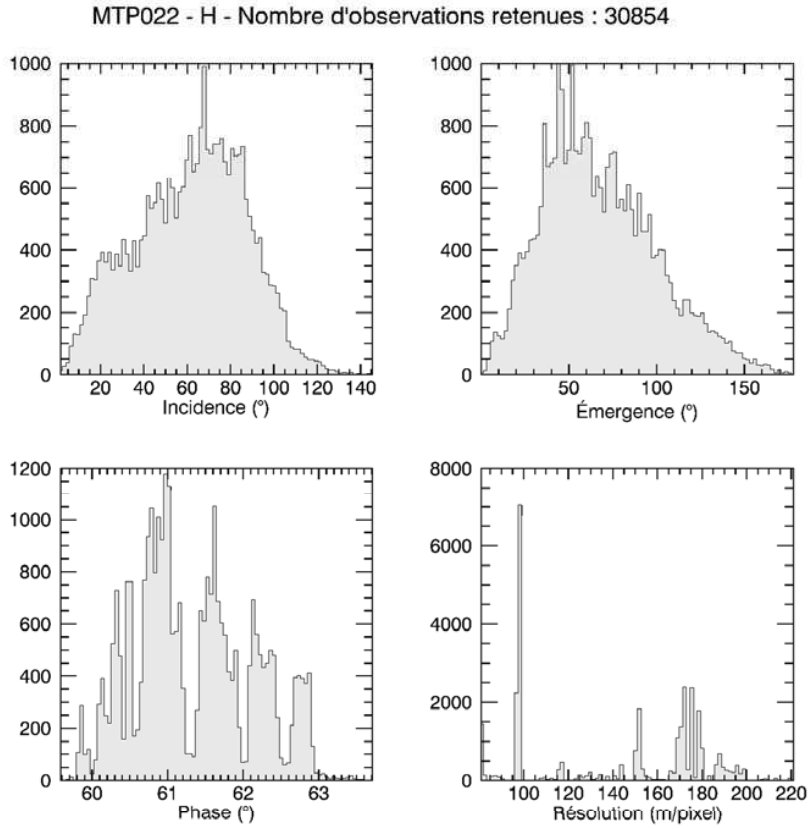

Carte de densité - Pixels exclus : 13.97%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
1282
1026
769
513
256
0

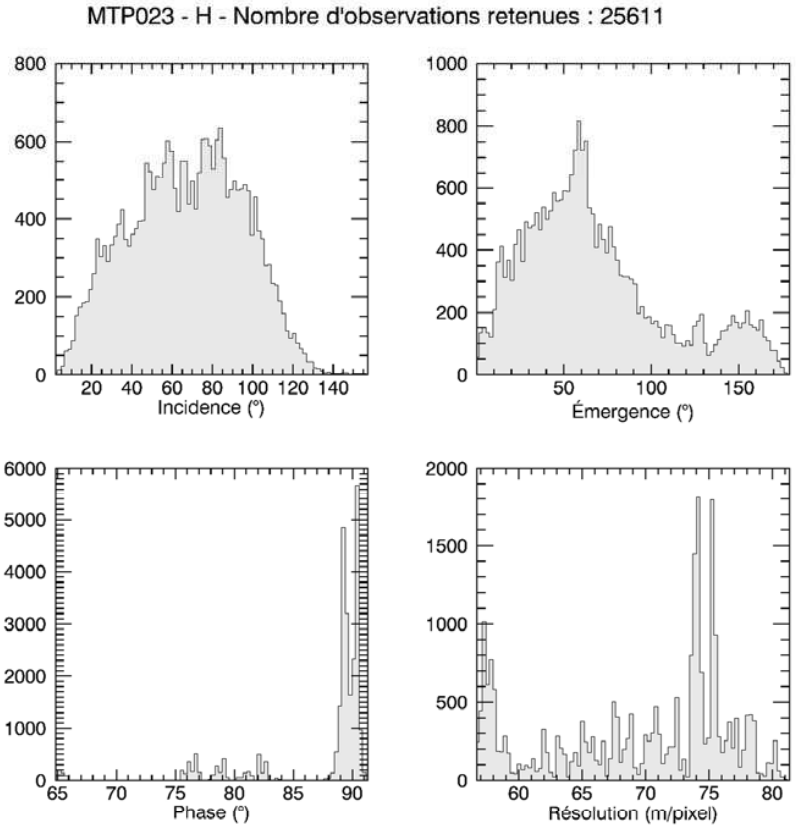

MTP020 - H - Nombre d'observations retenues : 7624
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

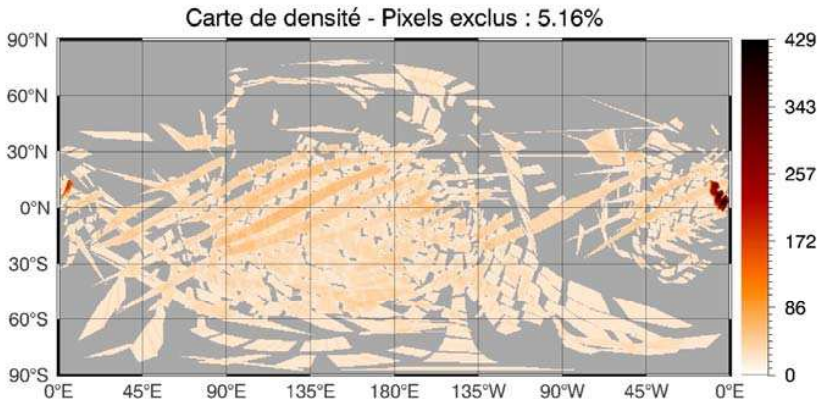

MTP021 - H - Nombre d'observations retenues : 12048
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

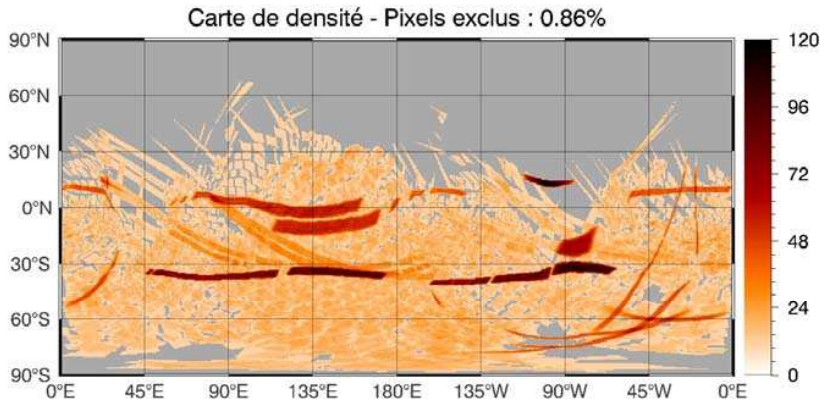

Carte de densité - Pixels exclus : 5.89%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
939
751
563
376
188
0

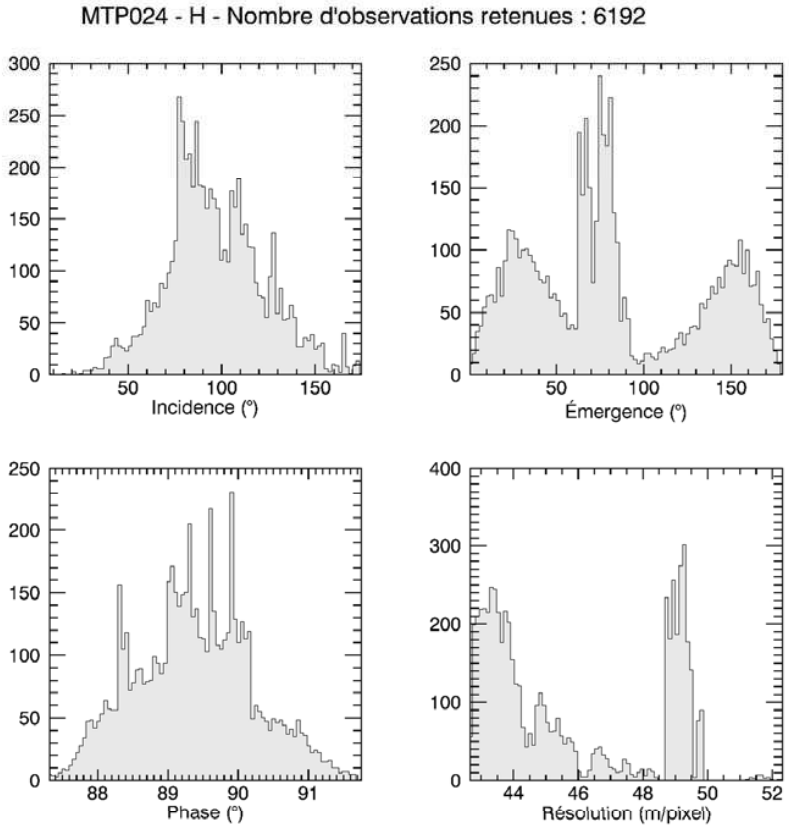

Carte de densité - Pixels exclus : 6.53%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
427
342
256
171
85
0

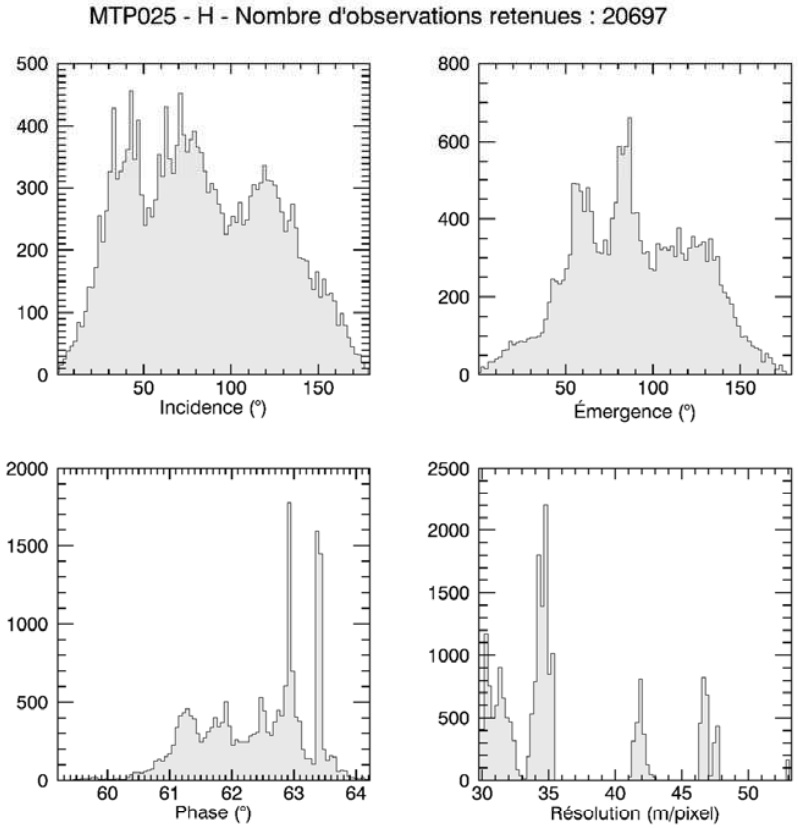

MTP022 - H - Nombre d'observations retenues : 30854
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

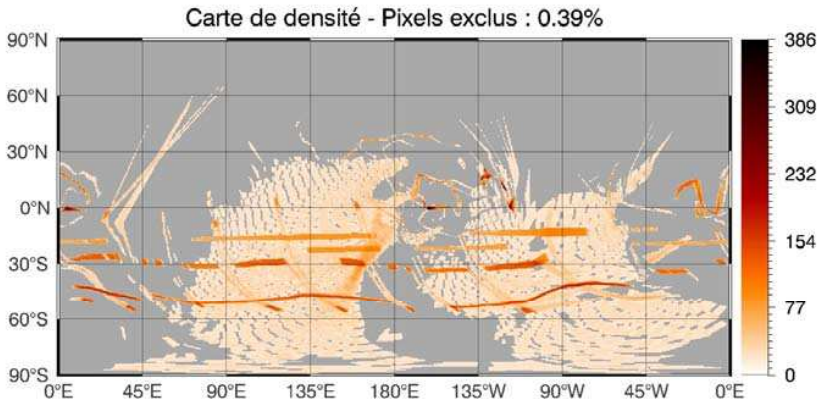

MTP023 - H - Nombre d'observations retenues : 25611
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

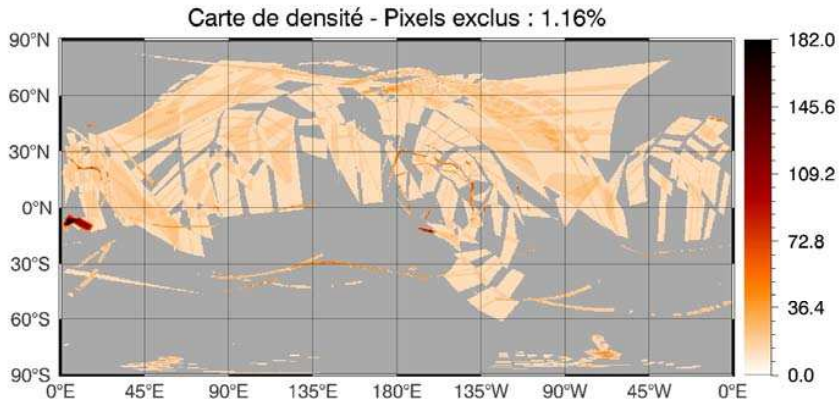

Carte de densité - Pixels exclus : 5.16%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
429
343
257
172
86
0

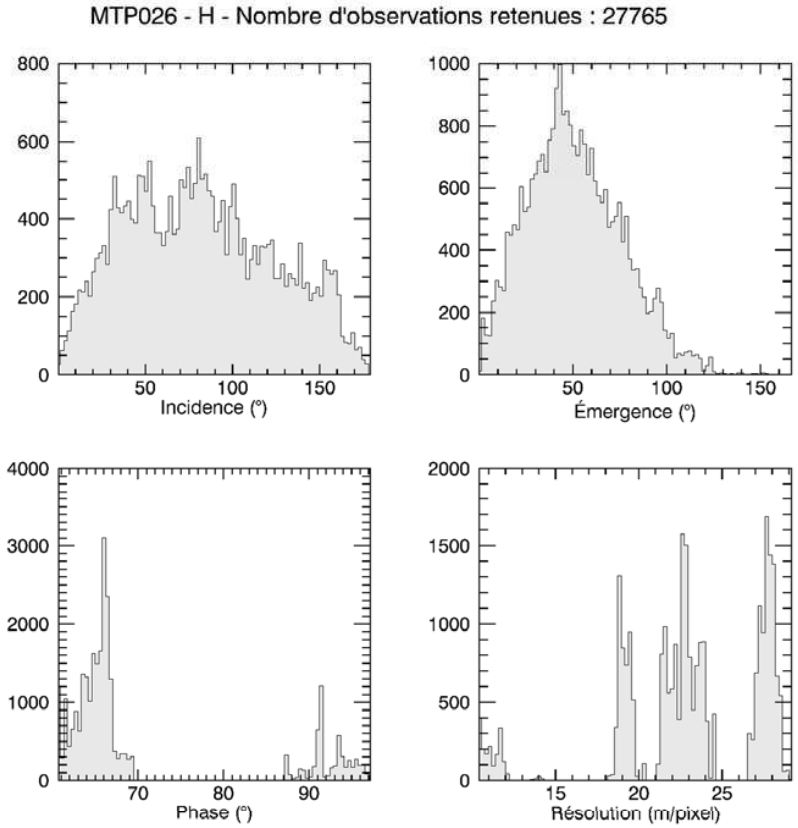

Carte de densité - Pixels exclus : 0.86%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
120
96
72
48
24
0

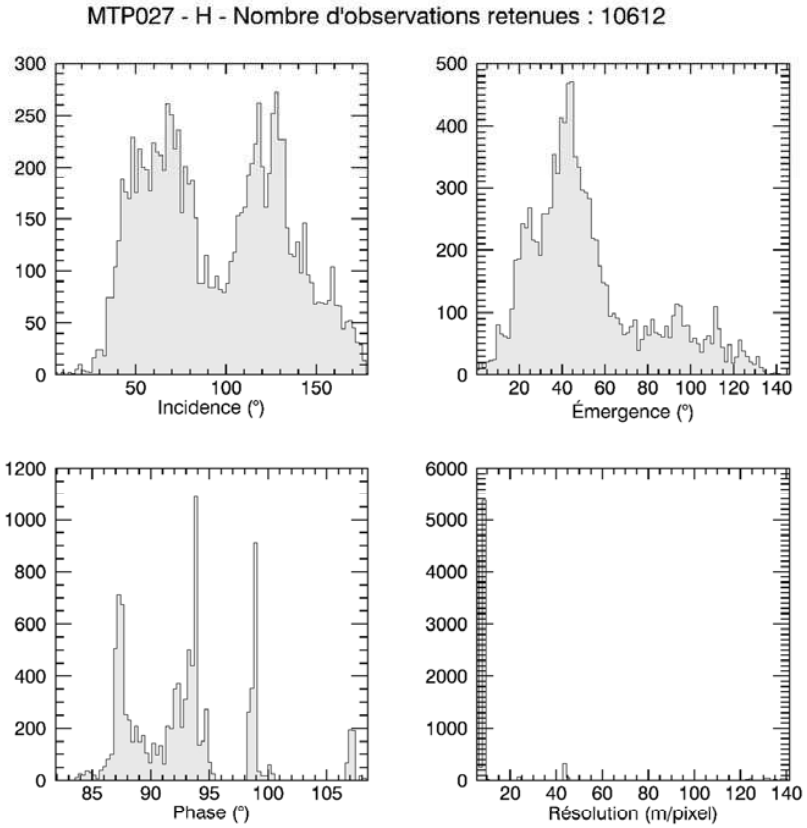

MTP024 - H - Nombre d'observations retenues : 6192
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

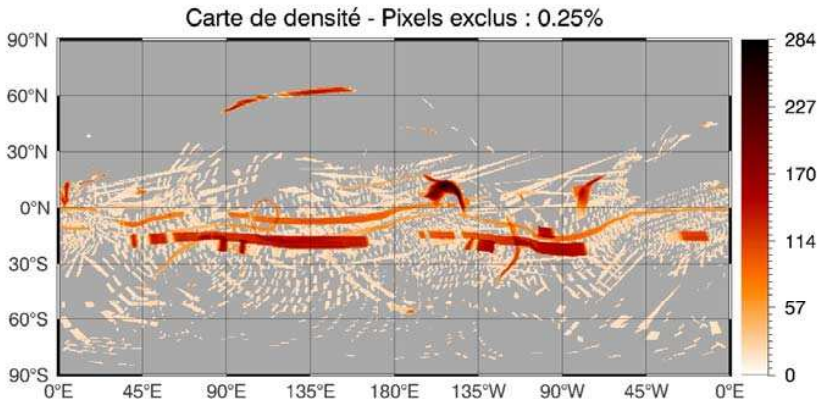

MTP025 - H - Nombre d'observations retenues : 20697
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

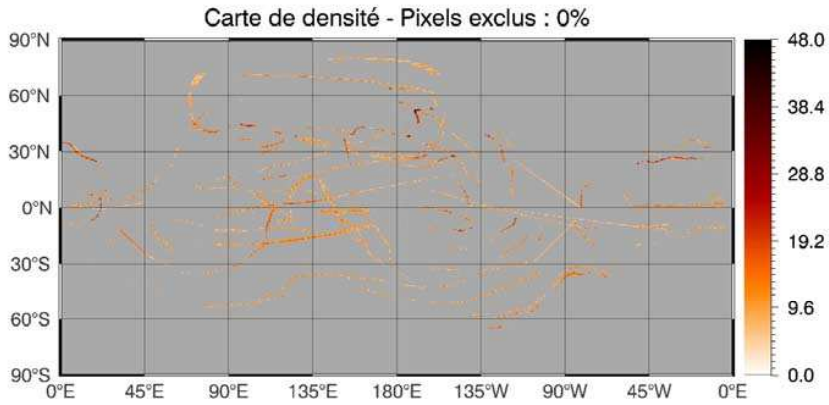

Carte de densité - Pixels exclus : 0.39%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
386
309
232
154
77
0

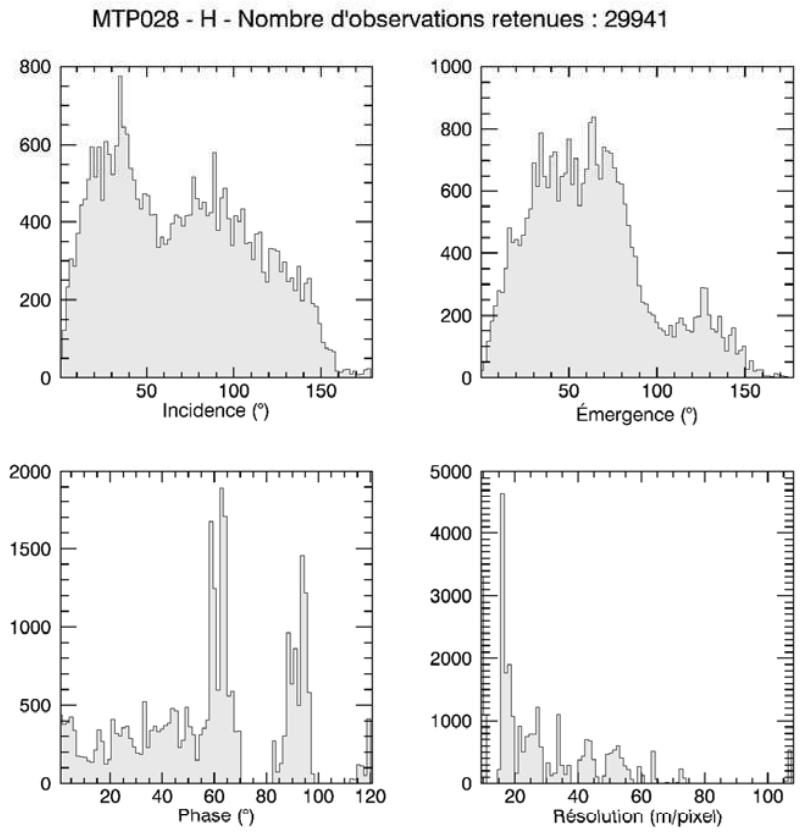

Carte de densité - Pixels exclus : 1.16%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
182.0
145.6
109.2
72.8
36.4
0.0

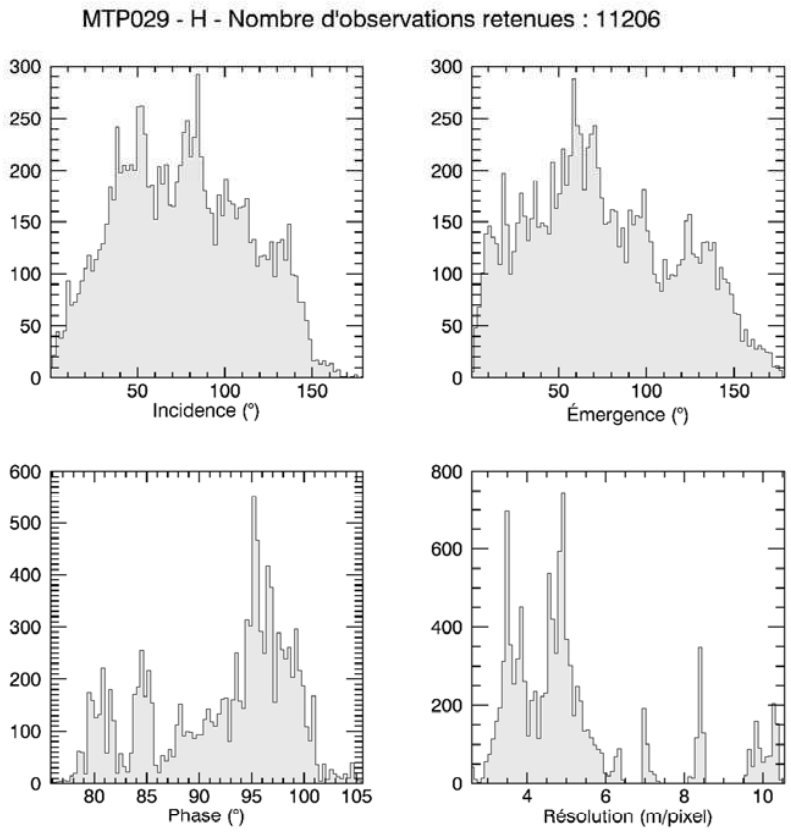

MTP026 - H - Nombre d'observations retenues : 27765
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

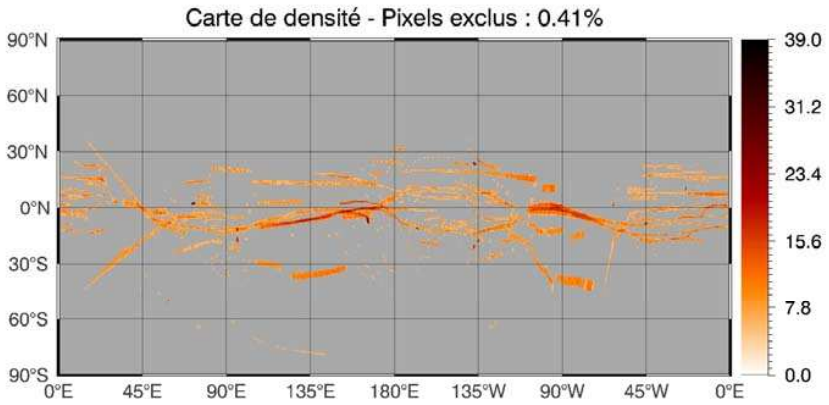

MTP027 - H - Nombre d'observations retenues : 10612
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

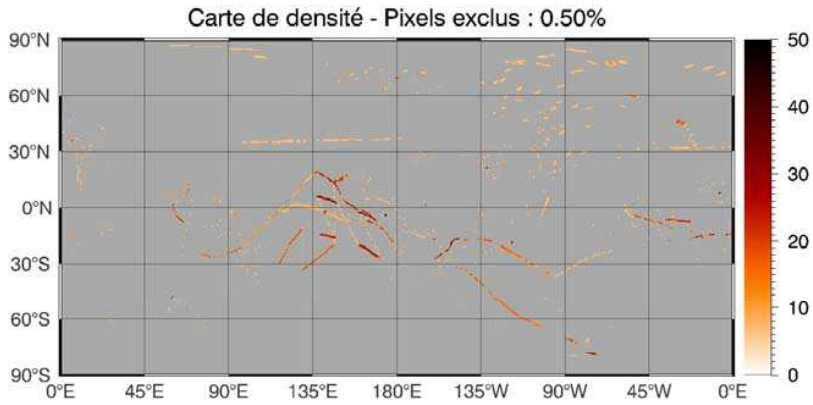

Carte de densité - Pixels exclus : 0.25%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
284
227
170
114
57
0

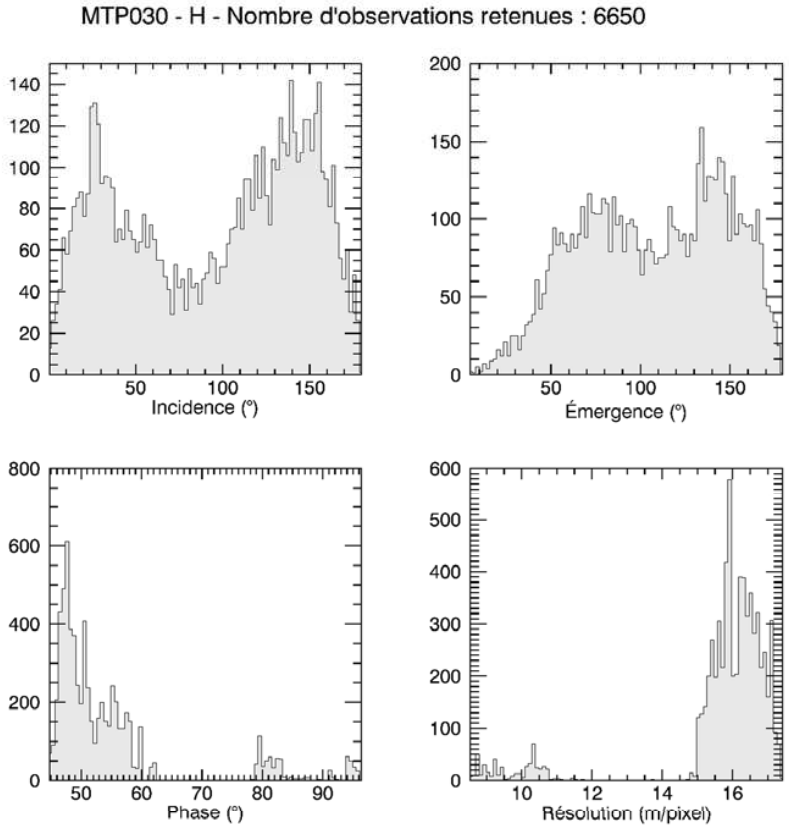

Carte de densité - Pixels exclus : 0%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
48.0
38.4
28.8
19.2
9.6
0.0

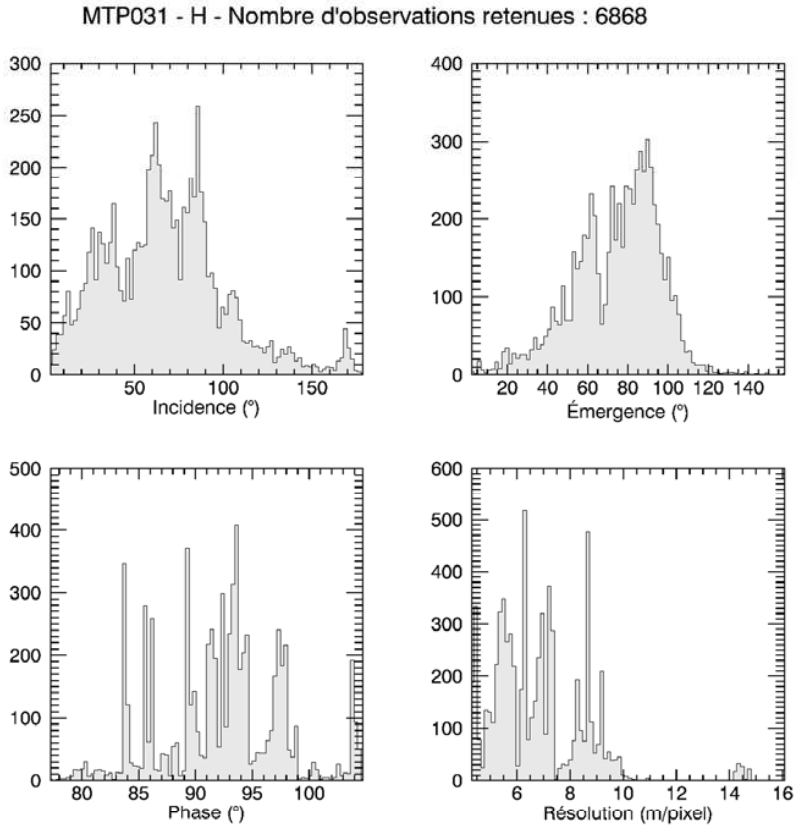

MTP028 - H - Nombre d'observations retenues : 29941
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

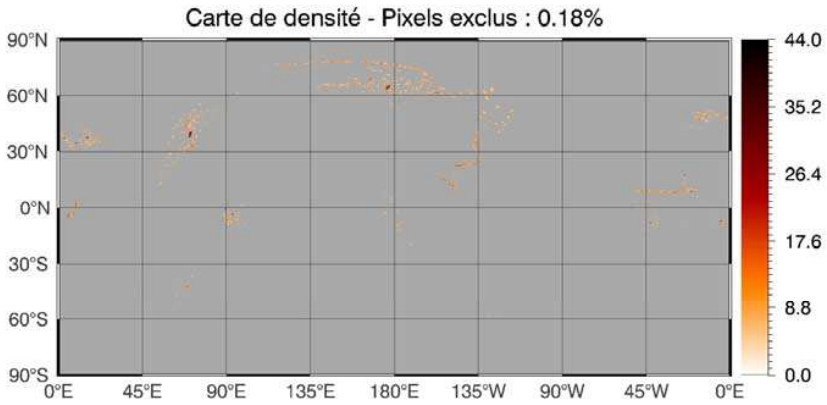

MTP029 - H - Nombre d'observations retenues : 11206
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

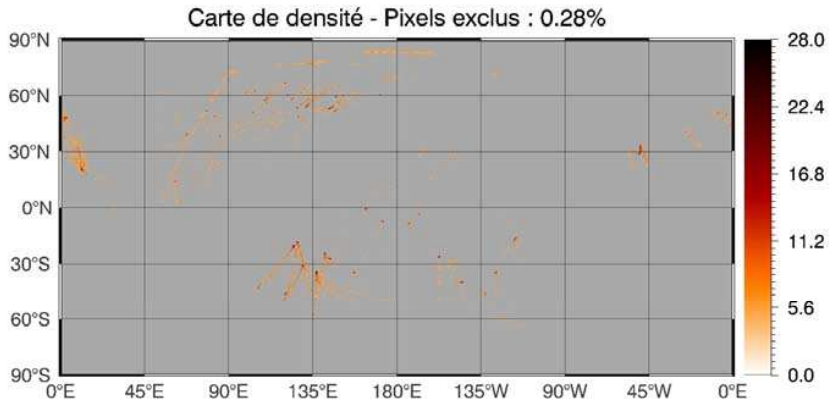

Carte de densité - Pixels exclus : 0.41%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
39.0
31.2
23.4
15.6
7.8
0.0

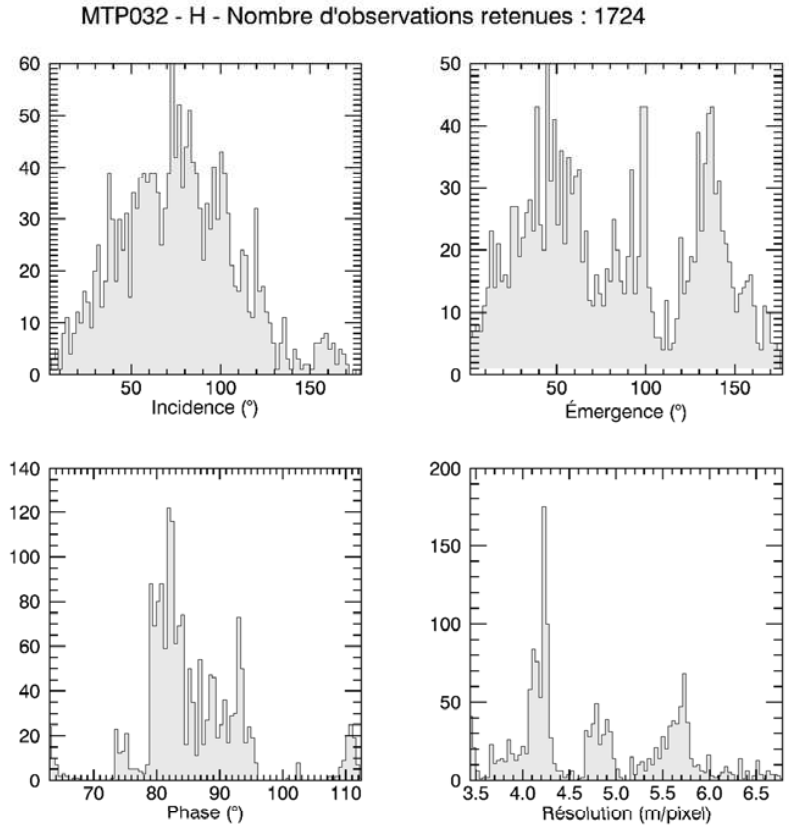

Carte de densité - Pixels exclus : 0.50%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
50
40
30
20
10
0

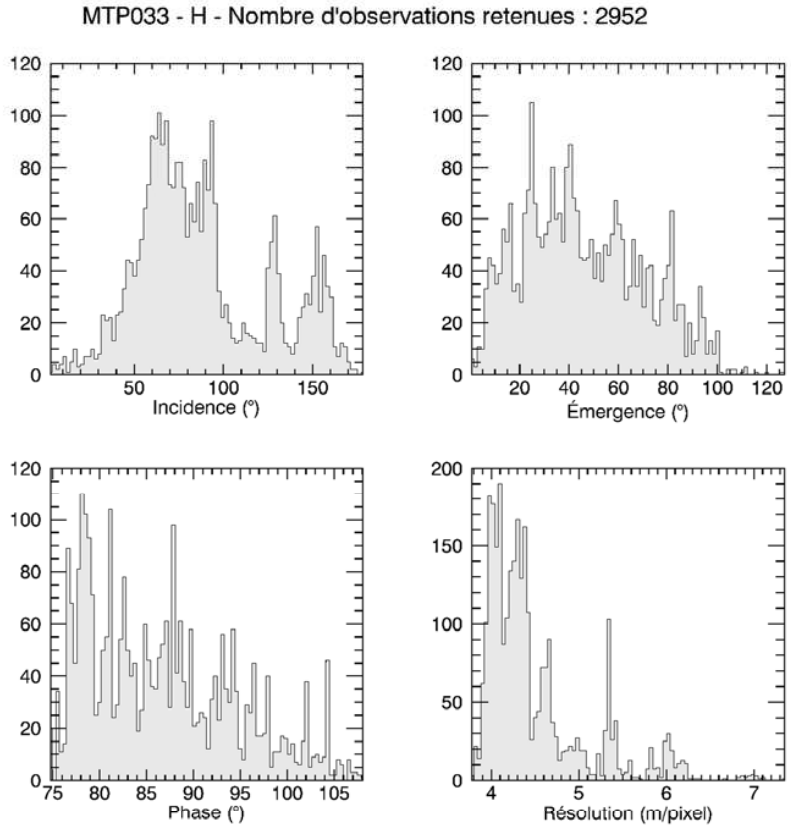

MTP030 - H - Nombre d'observations retenues : 6650
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

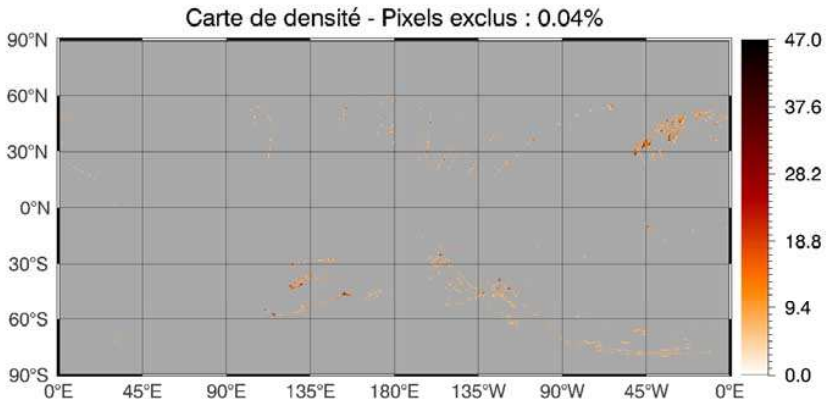

MTP031 - H - Nombre d'observations retenues : 6868
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

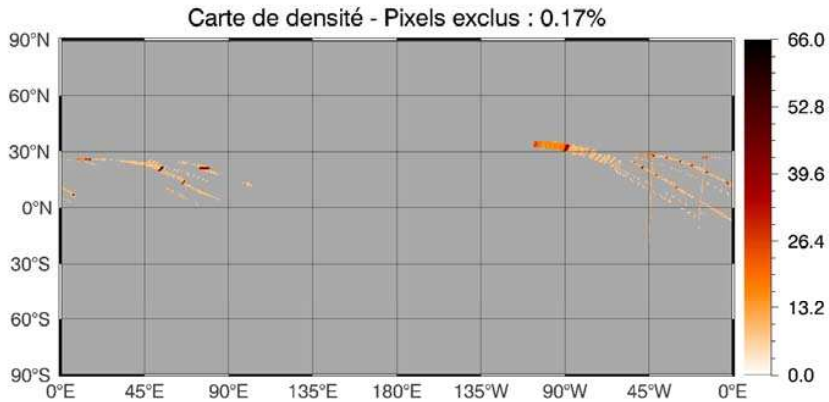

Carte de densité - Pixels exclus : 0.18%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
44.0
35.2
26.4
17.6
8.8
0.0

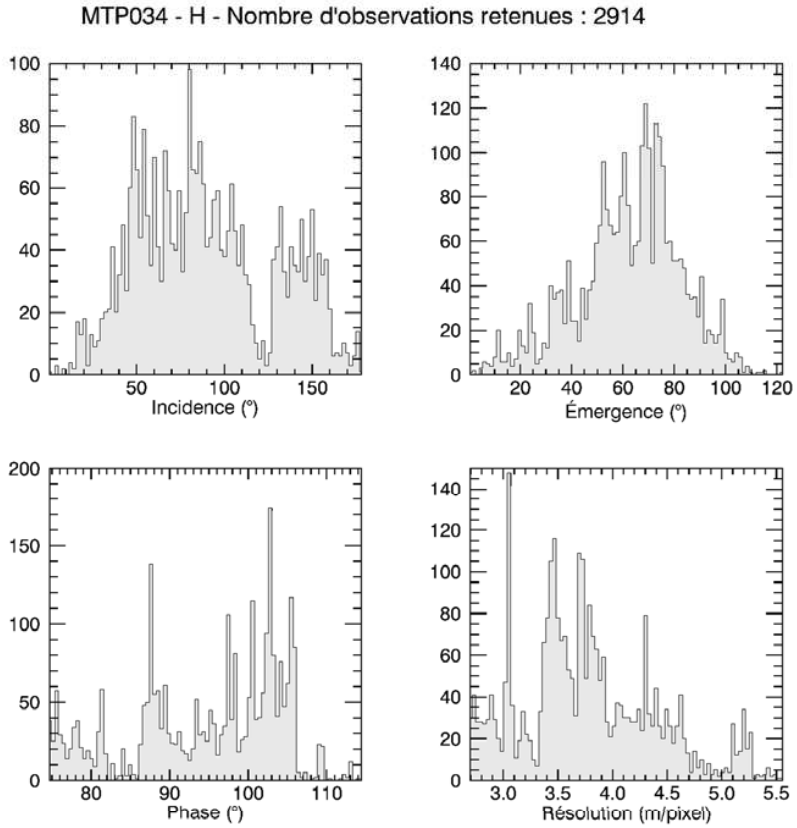

Carte de densité - Pixels exclus : 0.28%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
28.0
22.4
16.8
11.2
5.6
0.0

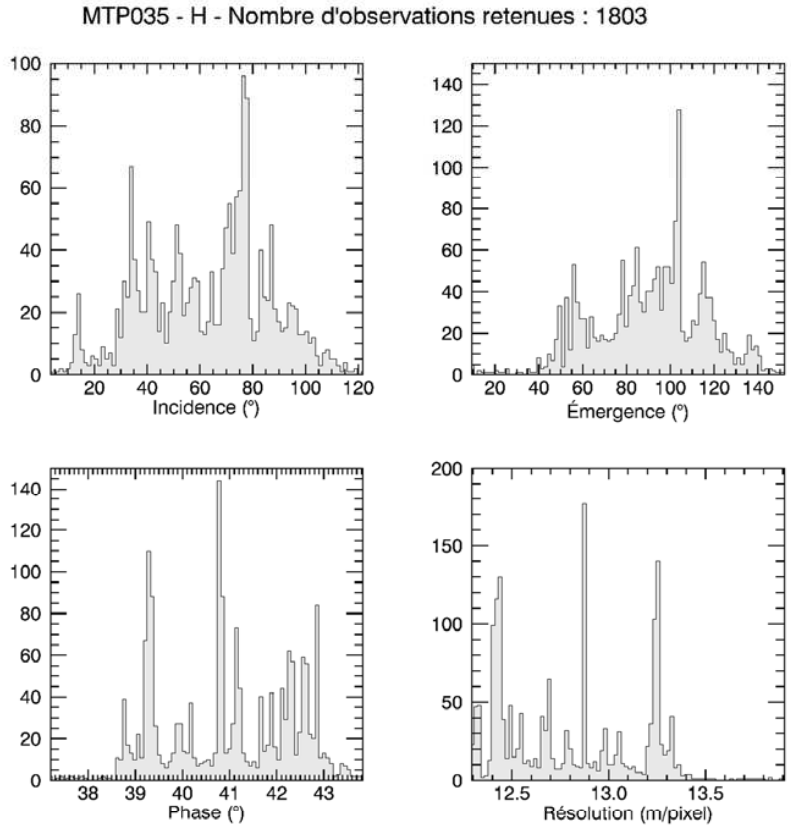

MTP032 - H - Nombre d'observations retenues : 1724
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)


MTP033 - H - Nombre d'observations retenues : 2952
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)


Carte de densité - Pixels exclus : 0.04%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
47.0
37.6
28.2
18.8
9.4
0.0


Carte de densité - Pixels exclus : 0.17%
90°N
60°N
30°N
0°N
30°S
60°S
90°S
0°E
45°E
90°E
135°E
180°E
135°W
90°W
45°W
0°E
66.0
52.8
39.6
26.4
13.2
0.0


MTP034 - H - Nombre d'observations retenues : 2914
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)


MTP035 - H - Nombre d'observations retenues : 1803
Incidence (°)
Émergence (°)
Phase (°)
Résolution (m/pixel)

Cubes VIRTIS-M utilisé pour l'étude de la région Imhotep

VISIBLE	INFRAROUGE
MTP006\STP013\V1_00366679119.CAL	MTP006\STP013\I1_00366679117.CAL
MTP006\STP013\V1_00366686318.CAL	MTP006\STP013\I1_00366686316.CAL
MTP006\STP013\V1_00366693519.CAL	MTP006\STP013\I1_00366693517.CAL
MTP006\STP013\V1_00366725919.CAL	MTP006\STP013\I1_00366725917.CAL
MTP006\STP013\V1_00366729519.CAL	MTP006\STP013\I1_00366729517.CAL
MTP006\STP013\V1_00366733119.CAL	MTP006\STP013\I1_00366736717.CAL
MTP006\STP013\V1_00366736719.CAL	MTP006\STP013\I1_00366733117.CAL
MTP006\STP014\V1_00367617964.CAL	MTP006\STP014\I1_00367628615.CAL(1)
MTP006\STP015\V1_00368245721.CAL	MTP006\STP015\I1_00368245714.CAL
MTP007\STP016\V1_00368291078.CAL	MTP007\STP016\I1_00368291071.CAL
MTP007\STP017\V1_00369184121.CAL(1)	MTP009\STP025\I1_00373202012.CAL
MTP009\STP025\V1_00373202014.CAL	MTP009\STP025\I1_00373202992.CAL
MTP009\STP025\V1_00373202994.CAL	MTP009\STP025\I1_00373248812.CAL
MTP009\STP025\V1_00373248814.CAL	MTP009\STP025\I1_00373249792.CAL
MTP009\STP025\V1_00373249794.CAL	MTP013\STP046\I1_00384381667.CAL
MTP013\STP046\V1_00384381670.CAL	MTP014\STP048\I1_00385545379.CAL
MTP014\STP048\V1_00385590960.CAL	MTP014\STP048\I1_00385578000.CAL
MTP014\STP048\V1_00385545388.CAL	MTP014\STP048\I1_00385590951.CAL
MTP014\STP048\V1_00385683072.CAL	MTP014\STP048\I1_00385679403.CAL
MTP014\STP048\V1_00385681272.CAL	MTP014\STP048\I1_00385681263.CAL
MTP014\STP048\V1_00385541788.CAL	MTP014\STP048\I1_00385541779.CAL
MTP014\STP048\V1_00385679412.CAL	MTP014\STP048\I1_00385683063.CAL
MTP014\STP048\V1_00385578009.CAL	MTP014\STP048\I1_00385673652.CAL(2)
MTP014\STP048\V1_00385538188.CAL(2)	MTP014\STP048\I1_00385671792.CAL(2)
MTP014\STP048\V1_00385671801.CAL(2)	MTP014\STP048\I1_00385538179.CAL(2)
MTP014\STP048\V1_00385673661.CAL(2)	MTP015\STP053\I1_00388586067.CAL
MTP015\STP053\V1_00388586069.CAL	MTP015\STP053\I1_00388587446.CAL
MTP015\STP053\V1_00388587449.CAL	
MTP015\STP054\V1_00389295576.CAL	

TABLE 9.2 – Cubes VIRTIS-M visible et infrarouge utilisés dans l'étude de la région Imhotep. Les cubes annotés (1) ne couvrent que les terrains accidentés, les cubes annotés (2) ne couvrent que les terrains recouverts de poussières (voir 5.6 page 111).

Annexe de la partie III

Tableau des observations VIRTIS utilisées pour construire le spectre de référence

Visible	Infrarouge
V1_00366679119	I1_00366679117
V1_00366686318	I1_00366686316
V1_00366693519	I1_00366693517
V1_00366700719	I1_00366700717
V1_00366707918	I1_00366707916
V1_00366725919	I1_00366725917
V1_00366729519	I1_00366729517
V1_00366733119	I1_00366733117
V1_00366736719	I1_00366736717
V1_00366740319	I1_00366740317
V1_00366743919	I1_00366743917
V1_00366747519	I1_00366747517
V1_00366751119	I1_00366751117
V1_00366754719	I1_00366754717
V1_00366758319	I1_00366758317
V1_00366765519	I1_00366765517

TABLE 9.3 – Liste des cubes utilisés pour l'assemblage du spectre de référence VIRTIS et utilisé dans la partie III afin de le comparer aux spectres acquis en laboratoire. Ils ont tous été acquis durant le début de la mission Rosetta à la comète 67P/CG, pendant la phase MTP006/STP013 (le 14 et 15 aout 2014).

Protocoles / Paramètres	Broyage sec	Broyage colloïdal
Durée du broyage (min)	90	180
Vitesse de rotation (min^{-1})	500	500
Intervalle entre deux arrêts (min)	5	10
Temps d'arrêt (sec)	60	30
Inversion de la rotation	Oui	Oui

TABLE 9.4 – Paramètres de broyages.

Description du protocole expérimental pour le broyage des échantillons

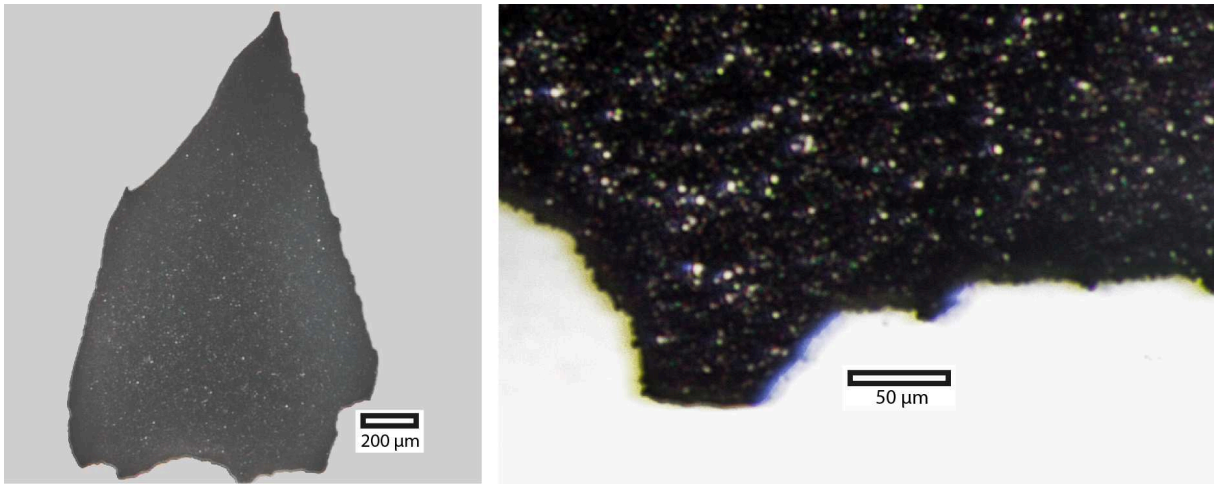
Préparation De manière générale le processus consiste à dégrossir l'échantillon initial afin d'obtenir une poudre suffisamment fine pour répondre au critère de granulométrie alimentée. Cette première étape de broyage se fait manuellement, dans un mortier en agate ici. Comme précisée précédemment, la granulométrie alimentée doit être inférieure à 3 mm pour un bol de broyage de 50 ml. Des tailles situées autour de 1 mm peuvent convenir si les billes de broyage font 2 mm, en revanche le broyage ne sera pas efficace si ce sont les billes de 0.5 mm qui sont utilisées. L'adéquation entre la taille du matériau et la taille des billes est donc primordiale pour une meilleure efficacité.

Broyage planétaire La deuxième étape est le broyage planétaire. Selon la ductilité du matériau, la production d'une poudre fine à la main peut être difficile, c'est par exemple le cas avec le PSOC 1532 qui est assez ductile. Dans ce cas, il est préférable de réaliser un broyage planétaire à sec, avec les billes de 2 mm. Ce broyage à sec sera suivi du broyage colloïdal, en utilisant les billes de 0.5 mm de diamètre afin d'accéder à des tailles finales très petites. Le solvant utilisé dépend évidemment du matériau introduit. Pour les différents cas de figures qui se présentent ici, pyrrhotite, PSOC 1532, silicates, de l'éthanol a été utilisé. N'altérant ni les échantillons ni les matériaux constituant le bol de broyage et les billes il a en plus l'avantage de s'évaporer rapidement, cela fait de lui un bon candidat liquide.

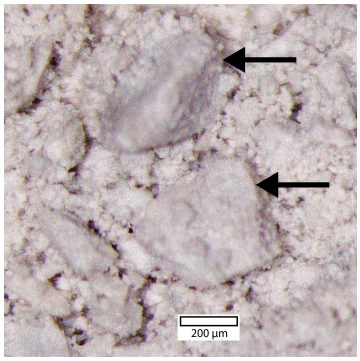
Différents paramètres peuvent être programmés sur le broyeur. Le temps en premier lieu mais également la vitesse de rotation, de 100 à 650 rotations par minute. Il est aussi possible d'arrêter la rotation avant de la reprendre au bout d'un temps choisi par l'utilisateur ; lors de la reprise, la rotation peut être inversée, ceci dans un but d'efficacité ou pour éviter une chauffe importante du contenu par exemple.

Deux séries de paramètres ont été choisis selon que le broyage est réalisé à sec ou avec de l'éthanol. Ces paramètres sont résumés dans le tableau 9.4.

Extraction L'étape suivante est celle de l'extraction. Une fois le broyage terminé, les billes doivent être séparées du reste du mélange. Une série de tamis, dont le plus fin retient les tailles supérieures à 25 µm, est alors utilisé. Ces tamis permettent de retenir les billes mais aussi les plus « gros » morceaux de matériau qui n'aurait pas été broyé. Un broyage efficace à 100% ne pouvant être garanti, cette étape est donc importante si l'on veut effectivement ne garder que la plus petite



(a) Morceau de croute de pyrrhotite formée après évaporation de l'éthanol. Images réalisées à la binoculaire



(b) Agrégats de dunite (flèches) dans une poudre.

FIGURE 9.14 – Croute de dessiccation de pyrrhotite (a) et agrégats de dunite (b).

fraction de particules. Il est ensuite nécessaire de se débarrasser du solvant dans lequel sont les particules. Leur petite taille fait qu'elles sont en suspension et forment une solution avec l'éthanol. Un moyen assez simple pour les séparer est alors de placer le tout dans un four, autour de 50°C pour éviter l'ébullition de l'éthanol, et sous vide pour accélérer le processus et éviter la saturation de l'air intérieur.

Une fois l'éthanol totalement évaporé, il ne reste qu'une très fine couche de particules (voir photo schéma 7.18 page 165 et photos 9.14a). L'évaporation a favorisé leur cohésion et une croute, très fragile, s'est formée. Pour retrouver l'aspect d'une poudre, il suffit alors d'utiliser le mortier et de mélanger doucement. La formation de cette croute par évaporation est un processus crucial car la cohésion des particules entre elles est suffisamment importante pour qu'elles forment des agrégats. On entend ainsi par agrégat un ensemble de très petites particules « collées » les unes aux autres et formant un ensemble cohérent de quelques centaines de micromètres généralement (voir photo 9.14b). Ces agrégats se sont formés préférentiellement avec le PSOC 1532 ou la dunite 2. La pyrrhotite y est moins sujette et se casse plus facilement. Quant à la dunite 1, il n'a pas été observé d'agrégats dans l'échantillon de poudre fournie, sans savoir à quoi cela est dû.

Mélange Les mesures présentées dans le chapitre 8 page 171 ont été réalisées sur des mélanges de poudres issues des matériaux susmentionnés. Pour préparer ces mélanges, deux techniques sont

possibles. La première méthode consiste à utiliser le vibro-broyeur de la figure 7.17a page 164. Un réservoir dans lequel est introduit une petite quantité de matière ainsi qu'une bille en agate est secoué fortement et permet de broyer et mélanger l'échantillon. En retirant la bille, aucune force de friction importante n'aura lieu lors du processus. Avec une fréquence de l'ordre de 10 à 15Hz et un temps de 5 minutes, il est alors possible d'homogénéiser aisément deux poudres. La deuxième méthode, la plus simple, consiste à mélanger les deux poudres dans un mortier.
Les deux méthodes ont chacune leur particularité. En effet, le mélange automatique, réalisé avec le vibro-broyeur, ne casse pas les agrégats de PSOC 1532 ou de dunite par exemple. En revanche c'est le cas lors d'un mélange à la main si on applique une pression suffisamment importante sur les poudres. Les deux techniques vont donc conduire à deux types de mélanges différent : mélange intime pour le mélange à la main et effet d'enrobage pour le mélange automatique.

Estimation du pourcentage massique des composés principaux du noyau de 67P

On tente ici d'estimer les pourcentages massiques à partir des pourcentages volumiques de Fulle et al. (2017) pour les principaux matériaux constituants le noyau de 67P. Ces **estimations** sont des ordres de grandeurs, calculer sans tenir compte des bars d'erreurs (parfois conséquentes). Ils ne sont donc en aucun cas à prendre pour des valeurs exactes. Le lecteur souhaitant se plonger dans ce sujet (rapport poussière/glace, volume, porosité...) est renvoyé vers les articles de Marco Fulle (Fulle, M. et al., 2015; Fulle et al., 2016b,a, 2017) ou vers les articles de COSIMA, GIADA ou CONSERT (Rotundi et al., 2015; Merouane et al., 2016; Hilchenbach et al., 2016; Della Corte et al., 2016; Hérique et al., 2016; Brouet et al., 2016; Kofman et al., 2015) (entre autres).

Les pourcentages volumiques de la glace, des sulfures de fer, des silicates et des organiques ainsi que les masses volumiques de sulfures de fer sont tirés de Fulle et al. (2017). Le volume et la masse du noyau ainsi que les masses volumiques des silicates et des organiques sont tirés de Pätzold et al. (2016).

Composé	Pourcentage volumique $pc_{v(x)}$ $(\%v)$	Masses volumique $\rho(x)$ $(kg.m^{-3})$
Sulfures de fer	4	$\rho_1 = 4600$
Silicates	22	$\rho_2 = 3000$
Organiques	54	$\rho_3 = 2200$
Glaces	20	X

La masse totale de 67P est estimé à $m_{tot} = 10,0.10^{12}\,kg$, son volume à $V_{tot} = 18,8.10^9\,m^3$ mais possède une macro-porosité de 0.4. Cela représente un volume sans porosité V_{np} que l'on estime à :

$$V_{np} = 0.4 \times V_{tot}$$
$$V_{np} = 7,5.10^9\,m^3$$

D'après Fulle et al. (2017), les grains de poussières et de glaces collectés par GIADA ont une microporosité de 59% et de 49% environ. On calcule le volume occupé par chaque composé par :

$$V_{(x)} = V_{np} \times pc_{v(x)} \times microporosité$$

Composé	Volume occupé sans porosité (m^{-3})
Sulfures de fer	$1,8.10^8$
Silicates	$9,7.10^9$
Organiques	$2,4.10^9$
Glaces	$7,4.10^8$

Il suffit alors de multiplier chaque composé par sa masse volumique pour retrouver la masse totale de chacun. A partir de cette étape on ignore les glaces car elles n'entrent pas dans la composition de nos échantillons. Il est possible, à partir de la masse totale m_{tot}, de retrouver la masse totale de chaque composé au sein du noyau. Puis, en la rapportant à la masse totale des matériaux réfractaires (sulfures de fer, silicates, organiques) – et donc en excluant les glaces – d'en déduire leur pourcentage massique.

Composé	Masse totale (kg)	Pourcentage massique (sans les glaces) $(\%m)$
Sulfures de fer	$8,3.10^{11}$	~ 9
Silicates	$2,9.10^{12}$	~ 32
Organiques	$5.3.10^{12}$	~ 59
Total	$9,0.10^{12}$	100

Liste des communications relatives à la thèse

Papiers référés

1er auteur

— **«Laboratory simulations of the Vis-NIR spectra of comet 67P using sub-µm sized cosmochemical analogues»,** Icarus, (2017), DOI : 10.1016/j.icarus.2017.10.015
B. Rousseau, S. Érard, P. Beck, É. Quirico, B. Schmitt, O. Brissaud, G. Montes-Hernandez, F. Capaccioni, G. Filacchione, D. Bockelée-Morvan, C. Leyrat, M. Ciarniello, A. Raponi, D. Kappel, G. Arnold, L. V. Moroz, Ernesto Palomba, Federico Tosi and the VIRTIS Team

Contributions

— **«VESPA : a community-driven Virtual Observatory in Planetary Science»**, Planetary and Space Science, (2017), DOI : 10.1016/j.pss.2017.05.013
S.. Érard, K. Benson, C. Chauvin, P. Bollard, D. Albert, N. Jourdane, J. Juaristi, J. Soucek, M. Bouchemit, J.-M. Glorian, P. Le Sidaner, A. Pio Rossi, M. Teresa Capria, M. Scherf, W. Thuillot, **B. Rousseau**, B. Schmitt, V. Génot, A. C. Vandaele, E. Millour, M. Minin, S. L. Ivanovski, A. Longobardo, D. Pisa, R. Hueso, L. Beigbeder, A. Lagain, M. Gangloff, B. Cecconi, A. Maattanen, B. Carry, F. Andrieu, O. Delaa, J. Desmars, P. Guio, T. Al-Ubaidi, N. Andre, C. Marmo, O. Santolik, P. Fernique, N. Achilleos, L. Trompet

— **«The temporal evolution of exposed water ice-rich areas on the surface of 67P/Churyumov-Gerasimenko : spectral analysis»,** Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 12/2016, DOI : 10.1093/mnras/stw3281
A. Raponi, M. Ciarniello, F. Capaccioni, G. Filacchione, F. Tosi, M. De Sanctis, M.T. Capria, M.A. Barucci, A. Longobardo, E. Palomba, D. Kappel, G. Arnold, S. Mottola, **B. Rousseau**, E. Quirico, G. Rinaldi, S. Érard, D. Bockele-Morvan, C. Leyrat

— **«The global surface composition of 67P/Churyumov-Gerasimenko nucleus by Rosetta/VIRTIS. II) Diurnal and seasonal variability»**, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 12/2016, DOI : 10.1093/mnras/stw3177
M. Ciarniello, A. Raponi, F. Capaccioni, G. Filacchione, F. Tosi, M. De Sanctis, D. Kappel, **B. Rousseau**, G. Arnold, M.T. Capria, M.A. Barucci, E. Quirico, A. Longobardo, E.Kührt, S. Mottola, S. Érard, D. Bockele-Morvan, C. Leyrat, A. Migliorini, A. Zinzi, E.Palomba, B. Schmitt, G. Piccioni, P. Cerroni, W. Ip, G. Rinaldi, M. Salatti

— **«Detection of exposed H2O ice on the nucleus of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko as observed by Rosetta OSIRIS and VIRTIS instruments»**, Astronomy & Astrophysics, 11/2016, DOI : 10.1051/0004-6361/201628764
M.A. Barucci, G. Filacchione, S. Fornasier, A. Raponi, J.D.P. Deshapriya, F. Tosi, C. Feller, M. Ciarniello, H. Sierks, F. Capaccioni, A. Pommerol, M. Massironi, N. Oklay, F. Merlin, J.-B. Vincent, M. Fulchignoni, A. Guilbert-Lepoutre, D. Perna, M.T. Capria, P. H. Hasselmann, **B. Rousseau**, C. Barbieri, D. Bockele-Morvan, P. L. Lamy, C. De Sanctis, R. Rodrigo, S. Erard, D. Koschny, C. Leyrat, H. Rickman, P. Drossart, H. U. Keller, M. F. A'Hearn, G. Arnold, J.-L. Bertaux, I. Bertini, P. Cerroni, G. Cremonese, V. Da Deppo, B. J. R. D.sson, S. Fonti, M. Fulle, O. Groussin, C. Güttler, S. F. Hviid, W. Ip, L. Jorda, D. Kappel, J. Knollenberg, J.-R. Kramm, E. Kührt, M. Küppers, L. Lara, M. Lazzarin, J. J. Lopez Moreno, F. Mancarella, F. Marzari, S. Mottola, G. Naletto, M. Pajola, E. Palomba, E. Quirico, B. Schmitt, N. Thomas, C. Tubiana

— **«The global surface composition of 67P/CG nucleus by Rosetta/VIRTIS. I) Prelanding mission phase»**, Icarus 274 (2016), 334-349, 08/2016, DOI : 10.1016/j.icarus.2016.02.055
G. Filacchione, F. Capaccioni, M. Ciarniello, A. Raponi, F. Tosi, M. Cristina De Sanctis, S. Erard, D. Bockelée Morvan, C. Leyrat, G. Arnold, B. Schmitt, E. Quirico, G. Piccioni, A. Migliorini, M. Teresa Capria, E. Palomba, P. Cerroni, A. Longobardo, A. Barucci, S. Fornasier, R. W. Carlson, R. Jaumann, K. Stephan, L. V. Moroz, D. Kappel, **B. Rousseau**, S. Fonti, F. Mancarella, D. Despan, M. Faure

— **«Refractory and semi-volatile organics at the surface of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko : Insights from the VIRTIS/Rosetta imaging spectrometer»**, Icarus 272 (2016), 32–47, 07/2016, DOI : 10.1016/j.icarus.2016.02.028
É. Quirico, L.V. Moroz, B. Schmitt, G. Arnold, M. Faure, P. Beck, L. Bonal, M. Ciarniello, F. Capaccioni, G. Filacchione, S. Erard, C. Leyrat, D. Bockelée-Morvan, A. Zinzi, E. Palomba, P. Drossart, F. Tosi, M.T. Capria, M.C. De Sanctis, A. Raponi, S. Fonti, F. Mancarella, V. Orofino, A. Barucci, M.I. Blecka, R. Carlson, D. Despan, A. Faure, S. Fornasier, M.S. Gudipati, A. Longobardo, K. Markus, V. Mennella, F. Merlin, G. Piccioni, **B. Rousseau**, F. Taylor

Communications en conférences

Oraux (colloques internationaux)

— **«Interpretation of VIRTIS/Rosetta surface spectra of comet 67P from laboratory reflectance measurements of cometary analogues**, including iron sulfides», EPSC2017-484
B. Rousseau, S. Érard, P. Beck, É. Quirico, B. Schmitt, O. Brissaud, F. Capaccioni, G. Filacchione, D. Bockelée-Morvan, C. Leyrat, M. Ciarniello, A. Raponi, D. Kappel, G. Arnold, L. V. Moroz and the VIRTIS Team

— **«Reproducing the VNIR spectra of 67P/Churyumov-Gerasimenko in the laboratory : clues to the composition of surface dust»**, ACM 2017
B. Rousseau, P. Beck (orateur), S. Érard, E. Quirico, B. Schmitt, G. Montes-Hernandez, L. Moroz, D. Kappel, K. Markus, G. Arnold, M. Ciarniello, A. Raponi, A. Longobardo, F. Capaccioni, G. Filacchione, D. Bockelée-Morvan, C. Leyrat and the VIRTIS Team

— **«Deciphering the composition of 67P/CG surface material : laboratory measurements»**, Symposium Comets 2016 : A new vision after Rosetta and Philae, 11/2016, Toulouse, France
B. Rousseau, S. Érard, P. Beck, É. Quirico, B. Schmitt, L. Bonal, F. Capaccioni, G. Filacchione, D. Bockelée-Morvan, C. Leyrat & The VIRTIS Team

— **«Sulfides and refractory organic matter at the surface of 67P/Churyumov-Gerasimenko : evidence from VIRTIS data and laboratory measurements»**, American Astronomical Society, DPS meeting #48, id.211.08
B. Rousseau, S. Érard, P. Beck, É. Quirico, B. Schmitt, L. Bonal, G. Montes-Hernandez, Lyuba Moroz, D. Kappel, K. Markus, G. Arnold, M. Ciarniello, A. Raponi, A. Longobardo, F. Capaccioni, G. Filacchione, D. Bockelée-Morvan, C. Leyrat

Oraux (colloques ou conférence à l'échelle nationale)

— **«De l'espace au laboratoire : comment fabriquer une comète à partir des observations VIRTIS/Rosetta de 67P/Churyumov-Gerasimenko»**, Elbereth 2016, IAP, Paris, France
B. Rousseau, S. Érard, P. Beck, E. Quirico, B. Schmitt, L. Bonal, F. Capaccioni, G. Filacchione, D. Bockelée-Morvan, C. Leyrat & The VIRTIS Team

— **«Étude photométrique et compositionnelle de la surface de la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko à l'aide de l'instrument VIRTIS-H/Rosetta»**, Éxobiologie Jeunes Chercheurs 2015, CNES Paris, France
B. Rousseau, S. Érard.

— **«Photométrie et composition à la surface d'une comète : étude de 67P/Churyumov-Gerasimenko à l'aide de l'instrument VIRTIS-H/Rosetta»**, Rencontre Jeunes Physiciens

2015, CNAM Paris, France
B. Rousseau, S. Érard.

Posters

— **«Local study of photometric variations at comet 67P/CG : a point of view from VIRTIS/Rosetta on Imhotep region»**, Symposium Comets 2016 : A new vision after Rosetta and Philae, 11/2016, Toulouse
B. Rousseau, S. Érard, F. Capaccioni, G. Filacchione, D. Bockelée-Morvan, C. Leyrat, M. Ciarniello, A. Raponi

— **«Thermal investigation on the nucleus of 67P/CG from the dataset of VIRTIS-H onboard Rosetta»**, EGU General Assembly 2016, Vol. 18, EGU2016-2810-2
B. Rousseau, S. Érard, F. Capaccioni, G. Filacchione, D. Bockelée-Morvan, C. Leyrat, F. Tosi.

— **«Time comparative photometric study of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko as seen by VIRTIS-H and VIRTIS-M onboard Rosetta»**, 50th ESLAB Symposium : «From Giotto to Rosetta», 2016
B. Rousseau, S. Érard, F. Capaccioni, G. Filacchione, D. Bockelée-Morvan, C. Leyrat.

— **«Photometric study of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko as seen by VIRTIS-H onboard Rosetta»**, EPSC 2015, id.EPSC2015-354
B. Rousseau, S. Érard, F. Capaccioni, G. Filacchione, D. Bockelée-Morvan, C. Leyrat, M. Ciarniello, A. Longobardo.

— **«Monitoring the Southern Polar Vortex on Titan with VIMS Onboard Cassini»**, 2015, LPSC Meeting #46, #1832
S. Le Mouélic, **B. Rousseau**, S. Rodriguez, T. Cornet, C. Sotin, P. Rannou, J. W. Barnes, R. H. Brown, B. J. Buratti, K. H. Baines, R. N. Clark, P. D. Nicholson.

— **«Monitoring the seasonal evolution of the north and south polar vortex on Titan during 10 years with Cassini/VIMS»**, 2014, AGU Meeting #47
S. Le Mouélic, **B. Rousseau**, S. Rodriguez, T. Cornet, C. Sotin, J. W. Barnes, R. H. Brown, B. J. Buratti, K. H. Baines, R. N. Clark and P. D. Nicholson.

Contributions mineures

— **«The temporal evolution of exposed water ice-rich areas on the surface of 67P/Churyumov-Gerasimenko : spectral analysis»**, Comets Symposium : A new vision after Rosetta and Philae, 11/2016, Toulouse, France
A. Raponi, M. Ciarniello, F. Capaccioni, G. Filacchione, F. Tosi, M.C. De Sanctis, M.T. Capria, M.A. Barucci, A. Longobardo, E. Palomba, D. Kappel, G. Arnold, S. Mottola, **B. Rousseau**, G.

Rinaldi, S. Erard, D. Bockelee-Morvan, C. Leyrat

— **«Mapping of thermal properties of comet 67P/C-G and temporal variations»**, American Astronomical Society, DPS meeting #48, id.219.02
C. Leyrat, F. Tosi, F. Capaccioni, S. Erard, **B. Rousseau**, G. Filacchione, M.T. Capria, M.C. De Sanctis, D. Bockelee-Morvan, E. Kührt, B. Schmitt, A. Migliorini, D. Kappel and The VRITIS Team

— **«Reflectance spectroscopy of natural organic solids, iron sulfides and their mixtures as refractory analogues for Rosetta/VIRTIS' surface composition analysis of 67P/CG»**, American Astronomical Society, DPS meeting #48, id.116.21
Lyuba V. Moroz, K. Markus, G. Arnold, D. Henckel, D. Kappel, U. Schade, **B. Rousseau**, E. Quirico, B. Schmitt, F. Capaccioni, D. Bockelée-Morvan, G. Filacchione, S. Erard , C. Leyrat and The VRITIS Team

— **«Photometric Behavior of 67P/CG Spectral Parameters as Inferred from Pre-Landing Data»**, 47th Lunar and Planetary Science Conference, 03/2016, LPI Contribution No. 1903, p.2222
A. Longobardo, E. Palomba, F. Capaccioni, M. Ciarniello, F. Tosi, G. Filacchione, S. Érard, S. Mottola, b, M.A. Barucci, A. Raponi, D. Bockelée-Morvan, C. Leyrat, D. Kappel, G. Arnold, A. Migliorini, B. Schmitt

— **«Photometric correction of VIRTIS spectra of 67P/CG : empirical approach»**, EPSC 2015, 10/2015, Nantes, France, id.EPSC2015-611
A. Longobardo, E. Palomba, F. Capaccioni, M. Ciarniello, F. Tosi, G. Filacchione, S. Érard, S. Mottola, B. Rousseau, A. Barucci, A. Raponi, D. Bockelée-Morvan, C. Leyrat

— **«Temperature and reflectance derivation from VIRTIS-H observations of 67P»**, EPSC 2015, 10/2015, Nantes, France, id.EPSC2015-419
S. Érard, F. Tosi, C. Leyrat, F. Capaccioni, G. Filacchione, D. Bockelée-Morvan, **B. Rousseau**, D. Despan, P. Drossart, B. Schmitt, E. Quirico

Ateliers/Réunions d'équipe/Séminaires

— «Atelier MultiPlaNets», DéfiImag'In, atelier pluridisciplinaire sur l'analyse de données hyperspectrales et le traitement du signal, Laboratoire GEOPS, Université Paris-Sud/Paris Saclay, présentation orale

— 9ème VIRTIS Team Meeting à Paris, 02/2015, présentation orale
— 10ème VIRTIS Team Meeting à Rome, 06/2015, présentation orale
— 11ème VIRTIS Team Meeting à Berlin, 11/2015, présentation orale
— 12ème VIRTIS Team Meeting à Genoble, 02/2016, présentation orale

— 13ème VIRTIS Team Meeting à Rome, 07/2016, deux présentations orales
— 14ème VIRTIS Team Meeting à Paris, 03/2017, présentation orale

— Séminaire au LESIA/Observatoire de Paris, 02/2017, présentation sur les travaux de recherche de thèse
— Séminaire à GEOPS/Université Paris-Sud/Paris-Saclay, 02/2017, présentation sur les travaux de recherche de thèse

Diffusion des connaissances

— Article de vulgarisation : «1986-2016 : 30 ans d'exploration cométaire» publié dans «Découverte», magazine du Palais de la Découverte tiré à 4000 exemplaires, septembre 2016

Résumé

Les comètes sont des témoins privilégiées de l'époque remontant à la formation du Système Solaire. Les étudier nous permet de mieux connaitre cette époque et de savoir comment elles se sont formées et évoluent en approchant du Soleil.
La sonde Rosetta a accompagné la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko durant deux ans. À son bord, le spectromètre VIRTIS a observé en permanence la surface et la coma de 67P. Mon travail a reposé sur le traitement et l'analyse des données de cet instrument et se concentre sur l'étude de la surface du noyau.
J'ai étudié les paramètres spectraux et photométriques à l'échelle globale et locale : albédo, pente spectrale, paramètres de diffusion par les particules... Les principaux objectifs ont été d'étudier leur distribution spatiale, de comparer les résultats venant de différents modèles et enfin de mieux contraindre les mécanismes liés à l'activité cométaire (dépôt de poussières, teneur en glace dans la sous-surface).
Dans la partie expérimentale de cette thèse, j'ai réalisé des mesures de réflectance sur des mélanges de matériaux analogues cométaires réduits en poudres micrométrique. J'ai alors étudié l'effet des paramètres de mélange, de la composition, de la taille des grains et reproduits les observations de VIRTIS dans le visible et le proche infrarouge.

Mots Clés

Comète – Rosetta/VIRTIS – Analyse de données – Imagerie hyperspectrale – Spectroscopie – Expériences de laboratoire

Abstract

Comets are preferable witnesses of the Solar System formation. Their study allow us to better understand this period and to know how they formed and evolve nowadays by approaching the Sun.
The Rosetta spacecraft followed the comet 67P/Churyumov-Gerasimenko during two years. The on board VIRTIS spectrometer observed continuously the surface and the coma of 67P. My work is based on the data processing and the analysis of the VIRTIS data and are focused on the study of the nucleus surface.
I studied the spectral and photometric parameters at a global and local scale : albedo, spectral slope, particles scattering parameters... The main objectives have been to study their spatial distribution, to compare the results coming from different models and finally to better constrain the mechanisms linked to the cometary activity (dust deposit, amount of ice in the sub-surface).
In the experimental part of this PhD thesis, I have realised reflectance measurements on mixes of cometary analogue materials reduced in micrometric powders. I have studied the effect of the mixing modalities, the composition, the grain sizes and reproduce the VIRTIS observations in the visible and near infrared.

Keywords

Comet – Rosetta/VIRTIS – Data analysis – Hyperspectral imaging – Spectroscopy – Laboratory experiments