UNIVERSITÉ DE NANTES
FACULTÉ DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

———

ÉCOLE DOCTORALE
SCIENCES POUR L'INGENIEUR, LES GEOSCIENCES ET L'ARCHITECTURE

N° attribué par la bibliothèque :

Année 2010

Etude expérimentale des signatures spectrales infrarouges des glaces d'eau et de dioxyde de carbone : applications aux satellites de glace

———

THÈSE DE DOCTORAT
Discipline : Sciences de la Terre et de l'Univers
Spécialité : Planétologie

Présentée
et soutenue publiquement par :

CECILE TAFFIN

Le 21 décembre 2010, devant le jury ci-dessous :

Président	M. Stéphane ERARD, *astronome*, LESIA
Rapporteurs	M. François POULET, *astronome*, Institut d'Astrophysique Spatiale
	M. Christophe SOTIN, *senior research scientist*, Jet Propulsion Laboratory
Examinateurs	M. Jean-Philippe COMBE, *research scientist*, BEAR-FIGHT CENTER
	M. Franck MONTMESSIN, *chargé de recherche*, LATMOS
Directeur de Thèse	M. Olivier GRASSET, *professeur*, Université de Nantes
Co-encadrant de Thèse	M. Stéphane LE MOUËLIC, *ingénieur de recherche au CNRS*, LPGN

Thèse préparée au Laboratoire de Planétologie et Géodynamique de Nantes (UMR CNRS 6112)

ED : … SPIGA…

Remerciements

Je souhaite remercier les membres du jury qui, pour la plupart ont traversé l'Atlantique pour venir à cette thèse. Les propositions de corrections de F. Poulet et de C. Sotin ont été très pertinentes et très appréciées. Je vous remercie donc de votre soigneuse lecture. Lors de la soutenance, les discussions scientifiques, suscitées par l'ensemble des membres du jury, les examinateurs, J.-P. Combe et F. Montmessin, et les rapporteurs, ont été très constructives : merci à vous. Je remercie également le président de ce jury, S. Erard.

Je souhaite remercier les membres de l'équipe dont j'ai fait partie pendant trois ans. Je vous remercie pour votre accueil, votre attention et votre disponibilité. Merci Olivier G., tu as su m'apprendre l'autonomie, la persévérance et la rigueur tout en m'épaulant quand j'en avais besoin. Avec toi, j'ai appris à programmer, à maniper et à interpréter. Erwan, tu es patient, créatif et efficace. D'ailleurs, ta créativité m'a impréssionnée dès le début de notre collaboration. Je te remercie de m'avoir aider et soutenue tout au long de ce travail, même dans les conditions les plus froides ! Merci Olivier B., ton volontariat pendant ton stage de M2 nous a permis d'obtenir des données importantes, la base (ou presque) d'un premier article qui a fait collaborer cette équipe et ta curiosité nous a sortis des problèmes (autant que possible) et a mis en évidence les pollutions des échantillons. Manuel, tu es arrivé lors de ma dernière année, tes solides compétences

en programmation nous ont aidé à comprendre le MGM. Je n'y serai pas arrivée sans toi ! Merci beaucoup de ton aide et de ta serviabilité. Stéphane, la première fois que je suis venue au laboratoire, le 27 avril 2007, tu m'as présenté des images de Titan. Je me souviens particulièrement de ce moment très émouvant. Je te remercie de ta passion et de ton entrain pour la planétologie.

Merci également à l'ensemble des membres de ce laboratoire qui permettent une ambiance agréable, favorable au travail et à la discussion scientifique. En particulier, je te remercie Olivier V., toi qui m'as soutenue et écoutée me morfondre, qui m'as accompagnée au karaté et au badminton, toi qui m'as aidée, qui m'aides et qui m'aideras à aller au-delà de la thèse. Merci Eric B. et Antoine M., vous m'avez soutenue et aidée pendant mon monitorat qui n'a pas été toujours facile à assumer avec ma formation. Je souhaite également te remercier Gabriel, pour les discussions très intéressantes que nous avons partagées et tes connaissances bibliographiques très étendues. Merci LPGN.

Merci à tous les thésards, ATER, post-doc et stagiaires que j'ai pu rencontrer au cours de cette thèse. En particulier à Marion et à Mathieu C. qui m'ont accueillie lors de mon arrivée au LPGN. Marion, nous avons connu des moments de joie et des moments stressants pas toujours faciles à gérer. Je te souhaite de réussir ta carrière de scientifique, très prometteuse. Courage, tu vas y arriver ! Merci Olivia, pour ton caractère bien à toi, ta franchise et ton humour m'ont beaucoup plu ! Tu m'as souvent écoutée et ouvert l'esprit, merci. Je te souhaite de trouver chaussure à ton pied, sans faire les magasins ! Pierre-André et Mélanie, vous êtes un couple charmant, vous m'avez permis d'imaginer ma vie autrement. Je vous souhaite beaucoup de bonheur partout dans le monde. Merci à tous ceux qui ont préparer et participer aux enterrements de vies de jeune fille et de jeune homme fantastiques, fabuleux, dont on se souviendra toute notre vie.

Je souhaite également remercier sincèrement ma famille. Merci à mes parents qui

m'ont soutenue au téléphone, qui sont venus régulièrement nous voir sur Nantes, qui nous aident autant qu'ils le peuvent. Merci de nous avoir poussés sur le chemin des études, de nous avoir ouvert l'esprit, de cacher vos peines quand vos enfants vous annoncent leur départ pour ne pas les attrister. Merci à mes beaux-parents qui nous ont aidés et soutenus. Merci aussi à mes frères, soeur, beaux-frères et belles-soeurs, pour l'entraide, la solidarité et les fous rires. Merci à ceux qui ont pu se déplacer à la soutenance malgré la neige, merci à ceux qui n'ont pas pu venir mais qui ont pensé à nous lors de cette fameuse journée. Merci également aux oncles, tantes, beaux-oncles, belles-tantes et belle grand-mère de nous soutenir.

Merci à toi, Guillaume. C'est toi qui as été mon coatch, qui m'as aidée en coulisses, qui as relu un manuscrit incompréhensible, qui m'as écoutée parler quand ça n'allait pas, quand le moral était au plus bas. Merci à toi de m'avoir suivie dans cette folle aventure ! Je suis très fière de toi. Les débuts à Nantes n'ont pas été faciles, mais tu as su remonter la pente. Tu m'as proposé de nous marier (j'en ai encore le coeur qui pétille). Préparation d'un mariage en quatre mois, quel exploit, quel bonheur ! Tu as assuré le développement de ton entreprise, de ta formation tout en gérant la maison. Tu es courageux et je suis convaincue que tu réussiras ta carrière. Guillaume, je t'aime.

Table des matières

Remerciements **i**

Introduction **1**

I Contexte de l'étude **5**

I.1 Contexte planétologique 6

I.1.1 Les missions Cassini-Huygens et Galileo 6

I.1.2 Les spectro-imageurs VIMS et NIMS 14

I.1.3 Les glaces d'intérêt planétologique 20

I.2 Les lunes au cœur de l'étude 52

I.2.1 Encelade 53

I.2.2 Callisto 59

I.2.3 Ganymède 64

I.2.4 Europe 70

I.2.5 Japet, Hypérion et Phoebe : trois satellites saturniens 79

II Appareillage et méthodologie **83**

II.1 Matériel et technique 84

II.1.1 Le cryostat à azote liquide 84

II.1.2 Contrôle de la température et de la taille de grain 91
II.2 La spectroscopie infrarouge 96
II.2.1 Rappel sur le principe physique 96
II.2.2 Le spectromètre infrarouge à transformée de Fourier 103
II.2.3 Le background 108
II.2.4 Lien entre l'observation naturelle et les expériences de laboratoire 112
II.3 Les logiciels de traitement des spectres 113
II.3.1 Lissage et continuum 114
II.3.2 Le Modèle Gaussien Modifié 120
II.3.3 Le Logiciel OriginPro© 126
II.3.4 Les aires totales et les aires réduites 135

III La glace d'eau pure 139

III.1 Le protocole expérimental 140
III.1.1 Synthèse et chargement 140
III.1.2 Sélection des données 143
III.1.3 Choix des caractéristiques spectrales étudiées 147
III.2 Influence de la température et de la taille de grains 148
III.2.1 Etudes précédentes 149
III.2.2 Elaboration de la loi 150
III.2.3 Dépendance des gaussiennes 152
III.2.4 Dépendance des aires 162

IV Influence du dioxyde de carbone 171

IV.1 Protocoles expérimentaux 172
IV.1.1 Le dioxyde de carbone pur 172

IV.1.2 Les mélanges de glaces d'eau et de dioxyde de carbone 173
IV.1.3 Les clathrates de dioxyde de carbone 175
IV.2 Acquisition des données 177
IV.2.1 Configuration d'acquisition 178
IV.2.2 Présentation des spectres et des images 178
IV.2.3 Choix des bandes d'absorption étudiées 192
IV.3 Traitement des données 193
IV.3.1 Signatures infrarouges de la glace d'eau et des clathrates de CO_2 193
IV.3.2 Signatures infrarouges du dioxyde de carbone et des clathrates de CO_2 200
IV.3.3 Signatures infrarouges des glaces d'eau, de dioxyde de carbone et de leur mélange 205
IV.3.4 Signatures infrarouges des mélanges et des clathrates de CO_2 . 207
IV.3.5 Résumé des vibrations 211

V Applications à la planétologie **215**

V.1 La glace d'eau et Encelade 215
V.1.1 Traitement des cubes 216
V.1.2 Projection des cartes de distribution en T et D 218
V.1.3 Discussion sur les résultats 223
V.1.4 Résumé : Publication 225
V.2 A la recherche du CO_2 sur les lunes de Jupiter et de Saturne 226
V.2.1 Ganymède et Callisto 227
V.2.2 Europe 230
V.2.3 La bande à 2,7 μm sur les satellites saturniens 232

V.2.4 La bande à 4,92 μm 236

Conclusion **239**

A Les manips **243**

B Les paramètres **283**

C Les programmes **413**

Bibliographie **449**

Table des figures

I.1 a) L'orbiteur Cassini et quelques instruments, b) *Composite Infrared Spectrometer*, c) *Imaging Science Subsystem* à angle étroit, d) *Imaging Science Subsystem* à grand angle, e) *Ultraviolet Imaging Spectrograph*, f) *Visual and Infrared Mapping Spectrometer*, g) *Cassini Plasma Spectrometer*, h) *Cosmic Dust Analyzer*, i) *Ion and Neutral Mass Spectrometer*, j) *Magnetometer*, k) *Magnetospheric Imaging Instrument* et l) *Radio and Plasma Wave Science*. 9

I.2 a) Photographie de Galileo et de l'ensemble de ses instruments, b) *Solid State Imaging*, c) *UltraViolet Spectrometer*, d) *Extreme UltraViolet Spectrometer*, e) *Near Infrared Mapping Spectrometer*, f) *PhotoPolarimeter-Radiometer*, g) *Dust Detector Subsystem*, h) *Energetic Particles Detector*, i) *Heavy Ion Counter*, j) *MAGnetometer*, k) *PLasma Subsystem* et l) *Plasma Wave Subsystem*. 12

I.3 Diagramme de phase de l'eau et de la glace d'eau, d'après ChemicaLogic, 1998. 23

I.4 Spectre expérimental de glace d'eau pure à 80 K pour une taille de grains de 211 μm. Les cadres de couleur mettent en évidence les zones étudiées. Le cadre rouge montre une partie du spectre qui est fortement bruitée en raison des limites instrumentales. 27

I.5 Spectre d'eau liquide en réflectance à température et pression ambiantes entre 1,2 et 2,5 μm. Acquisition sous le microscope infrarouge du spectromètre à transformée de Fourier le 9 avril 2008. 28

I.6 Comparaison des spectres d'eau liquide et solide. Les positions des bandes principales est décalée. Certaines bandes ne sont présentes que dans le spectre de glace (1,05, 1,30 et 1,65 μm et le pic de fresnel à 3,09 μm) et d'autres que dans le spectre d'eau liquide (1,78 μm). 29

I.7 Diagramme de phase du dioxyde de carbone, d'après ChemicaLogic, 1999. 31

I.8 Spectre de dioxyde de carbone solide d'un grain de 230 μm à 78,9 K. . 32

I.9 Spectre de dioxyde de carbone gazeux à 290 K. 33

I.10 Agrandissement de quatre parties du spectre de dioxyde de carbone solide. a) De 1,2 à 1,8 μm. b) De 1,9 à 2,1 μm. c) De 2,5 à 3 μm. d) De 3,8 à 5 μm. Les modes de vibration sont en partie indiqués près des bandes d'absorption correspondantes (Quirico et Schmitt, 1997; Dartois et Schmitt, 2009). 34

I.11 Représentation schématique des trois structures de clathrates sI, sII et sH. 37

I.12 Représentation schématique des cinq types de cages qui forment les différentes structures de clathrates et des associations possibles pour la formation des trois structures clathrates, sI, sII et sH. 38

I.13 Diagramme de phase de la glace d'eau, de la glace de CO_2 et des clathrates de CO_2. Indication des températures de surface de différents satellites de glace. 42

I.14 Photographies d'Encelade et des différentes unités géologiques observables à sa surface. 54

I.15 Extrait de Brown et al. (2006). Photographies et spectres de la surface d'Encelade. 60

I.16 Photographies de Callisto et des différentes unités géologiques observables à sa surface. 61

I.17 Photographies de Ganymède et des différentes unités géologiques observables à sa surface. 65

I.18 Photographies d'Europe et des différentes unités géologiques observables à sa surface. 72

II.1 Schéma du cryostat à azote liquide avec la coupelle en cuivre et le couvercle conçu pour les analyses d'échantillons macroscopiques. 85

II.2 Les améliorations des spectres de glace d'eau au laboratoire. En rouge, spectre de givre d'eau sans le nouveau couvercle avec un backgroung d'or lisse sans fenêtre saphir (ancienne référence, voir section II.2.3). En noir, spectre de givre d'eau avec une fenêtre saphir et un background d'or lisse. En vert, spectre de givre d'eau avec le nouveau couvercle du cryostat et une référence d'or rugueuse, (voir section II.2.3) 86

II.3 Photographie du cryostat à azote liquide dans la boîte à gants. 87

II.4 Cellule à atmosphère contrôlée conçue pour l'étude de la glace de dioxyde de carbone pure. La cellule est séparée de l'atmosphère du cryostat et reliée à l'entrée du dioxyde de carbone par un capillaire. 90

II.5 Photographie en transmission de grains de glace d'eau tamisés entre 180 et 354 μm acquise sous un microscope binoculaire dans la chambre froide. Les traits représentent les mesures effectuées sur les grains pour l'étude statistique. 93

II.6 Graphiques de la distribution de tailles de grains des échantillons d'eau à l'échelle macroscopique. 95

II.7 Modes de vibration d'élongation et de déformation des molécules d'eau et de dioxyde de carbone 98

II.8 Schéma des différents domaines spectraux existants d'après Roy (2007). Le domaine d'étude (entre 1 et 5 μm) fait partie du proche infrarouge . . 100

II.9 Schéma de l'interaction rayonnement lumière-matière (Combe, 2005). a) Interaction avec une surface théorique lisse (réflexion spéculaire), b) Interaction avec une surface théorique parfaitement diffusante (réflexion diffuse), c) Interaction avec une surface naturelle potentiellement lisse et d) Interaction avec une surface naturelle potentiellement diffusante . 101

II.10 Schéma explicatif de la technique d'imagerie hyperspectrale. 102

II.11 Photographie du spectromètre InfraRouge à Transformée de Fourier Nicolet 5700 de Thermofisher : Banc principal au centre et microscope Continμum à droite. 104

II.12 Schéma de principe de spectromètre infrarouge et de son interféromètre de Michelson. 105

II.13 Présentation de l'interface du logiciel OMNIC. La fenêtre de configuration de l'expérience est ouverte à l'onglet « *diagnostic* » pour effectuer l'alignement du spectromètre. 106

II.14 La fenêtre de configuration de l'expérience est ouverte à l'onglet « *banc* » pour vérifier l'ensemble des instruments (détecteur, séparatrice ...) vus par le logiciel, ainsi que la gamme spectrale d'analyse et les paramètres d'acquisition des spectres. 107

II.15 La fenêtre de configuration de l'expérience est ouverte à l'onglet « *Acquisition* » pour gérer les paramètres d'acquisition des spectres et du background. 108

II.16 a) Image de l'Infragold©, or rugueux qui permet d'acquérir un background adapté aux échantillons de l'étude. b) Profil microtopographique réalisé à l'Institut des Matériaux Jean Rouxel à Nantes (IMN). Ce profil, réalisé sur une longueur de cinq millimètres, illustre la rugosité du matériau. La granulométrie moyenne est de l'ordre de 200 μm, pour un dénivelé n'excédant pas 40 μm. 109

II.17 Spectres typiques d'un échantillon de glace d'eau à l'échelle macroscopique entre 1,35 et 2,25 μm à 80 et 180 K (respectivement rouge et noir) à 10^{-5} bar. 110

II.18 Spectre infrarouge de la pollution de nos échantillons (en rouge), identifiée par comparaison à de l'huile de silicone (en bleu) et de l'isobutylamine (en noir). 111

II.19 Présentation de la boîte de dialogue de la fonction de lissage sous Origin Pro©. L'ensemble des paramètres de la fonction sont modifiables avec cette interface. 115

II.20 Représentation graphique des résultats de lissages par la méthode Savitzky-Golay sous Origin Pro©. a) Résultat du lissage de la bande à 1,03 μm qui est la plus bruitée à cause de la limite du capteur. b) Résultat du lissage de la bande à 1,30 μm. c) Résultat du lissage de la bande à 1,65 μm. d) Résultat du lissage sur les épaulements des bandes d'absorption. Les lissages adoptés fournissent d'excellents résultats (a, d) sans compromettre les structures plus délicates (b, c). 117

II.21 Représentation schématique simple de la décomposition d'un spectre en la somme de son continuum et de ses bandes d'absorption. Ces images proviennent de l'Agence spatiale du Canada, http ://www.asc-csa.gc.ca/fra /educateurs/ressources/scisat/3sec-spectres.asp 118

II.22 Représentation des quatre continuums définis par des droites joignant les épaulements des bandes d'absorption. 119

II.23 Graphique représentatif des définitions des paramètres des gaussiennes utilisées. 121

II.24 Graphique représentatif des résultats de l'ajustement du MGM. La courbe orange est le spectre expérimental à ajuster, la courbe noire est le résultat de l'ajustement, les courbes bleues sont les gaussiennes qui ont permis l'ajustement, la courbe rouge est le continuum et la courbe verte est le résidu. 122

II.25 Etape 1 : Choix du type de traitement. 127

II.26 Etape 2 : Choix du type de continuum. 128

II.27 Etape 3 : Choix du nombre et de la position des gaussiennes. 129

II.28 Etape 4 : Choix du nombre d'itérations, de la précision du calcul et du nombre de points par gaussienne. 130

II.29 Etape 5 : Contrôle sur les critères (position, largeur, profondeur) des bandes d'absorption. 131

II.30 Etape 6 : Résultat du calcul itératif jusqu'à la convergence. 132

II.31 Etape 7 : Résultat du calcul itératif jusqu'à la convergence. 133

II.32 Résultats lisibles sur les feuilles d'Origin Pro©. 134

II.33 Schéma représentatif de l'aire réduite dessinée en orange, délimitée entre des spectres (différentes température, taille de grains constante) et une nouvelle ligne de base tracée entre les deux points d'ancrage. . . 136

III.1 Spectres d'absorption de la glace d'eau entre 2,8 et 3,1 μm. Trois des courbes présentés sont de la glace d'eau cristalline à 100 K (Bertie et al., 1969), à 150 K (Bergren et al., 1978) et à 270 K (Warren, 1984), respectivement ligne pleine, tirets, et petits tirets. La quatrième courbe (points-tirets) représente l'absorption de la glace d'eau amorphe à 80 K (Wood et Roux, 1982). 145

III.2 a) Spectres d'un échantillon de glace d'eau dont la taille moyenne des grains est 210 μm à différentes températures. b) Spectres de différents échantillons de glace d'eau, à différentes tailles de grains, à température constante (80 K). 146

III.3 Spectre expérimental de glace d'eau pure normalisé à 1 μm, à 80 K et environ 211 μm, en noir. Les cadres de couleur mettent en évidence les zones étudiées. Les carrés rouges représentent un spectre VIMS de la surface d'Encelade entre 1 et 2 μm, CM_1500061286_1·cub, pixel 6 :4. 148

III.4 A gauche, évolution de la température calculée en fonction de la température mesurée. A droite, évolution de la taille de grains calculée en fonction de la taille de grains mesurée. Les droites noires représentent la fonction $y = x$. 153

III.5 A gauche, évolution de la température calculée en fonction de la température mesurée. A droite, évolution de la taille de grains calculée en fonction de la taille de grains mesurée. Les droites noires représentent la fonction $y = x$. 155

III.6 En haut, évolution de la position de la gaussienne représentative de la bande à 1,5 μm en fonction de la température. En bas, évolution de la profondeur de la gaussienne représentative de la bande à 1,5 μm en fonction de la température. Les points orange correspondent aux résultats issus des ajustements avec Origin Pro© et les points verts à ceux obtenus avec le MGM. 157

III.7 Graphique représentatif des résultats de l'ajustement du MGM. La courbe orange est le spectre expérimental à ajuster, la courbe noire est le résultat de l'ajustement, les courbes bleues sont les gaussiennes qui ont permis l'ajustement, la courbe rouge est le continuum et la courbe verte est le résidu. Les mauvais ajustements sont mis en évidence par des ronds mauves. 158

III.8 Graphique représentatif des résultats de l'ajustement du MGM. La courbe rouge est le spectre expérimental à ajuster, la courbe bleue est le résultat de l'ajustement et la courbe verte est issue d'un calcul théorique du spectre. 160

III.9 Graphique représentatif des résultats de l'ajustement du MGM. La courbe rouge est le spectre expérimental à ajuster, la courbe bleue est le résultat de l'ajustement et la courbe verte est issue d'un calcul théorique du spectre. 161

III.10 Evolution de l'aire de Riemann normalisée des bandes à 1,03 et 1,30 μm en fonction de la taille de grains (en haut) et de la température (en bas). Chaque couleur correspond à une taille de grains ou un domaine de température. Le calcul des aires des spectres de S. Douté est ajouté pour comparaison. 163

III.11 Evolution de l'aire de Riemann normalisée des bandes à 1,50 et 2 μm en fonction de la taille de grains (en haut) et de la température (en bas). Chaque couleur correspond à une taille de grains ou un domaine de température. Le calcul des aires des spectres de S. Douté sont ajoutés pour comparaison. 163

III.12 A gauche, évolution de la température calculée en fonction de la température mesurée. A droite, évolution de la taille de grains calculée en fonction de la taille de grains mesurée. Les droites noires représentent la fonction $y = x$. 167

III.13 Représentation de la distribution en température (en haut) et en taille de grains (en bas) pour des erreurs relatives de 10 K et 25 μm. 168

IV.1 Photographie du dispositif expérimental de fabrication des clathrates de CO_2. 176

IV.2 Signature spectrale d'un grain de dioxyde de carbone de 230 μm à 78,9 K acquis dans la cellule du cryostat à azote liquide. 179

IV.3 Photographie de grains de glace de dioxyde de carbone à 100 K condensés dans la cellule de cuivre placée dans le cryostat. 180

IV.4 Spectre de dioxyde de carbone gazeux à 290 K. 181

IV.5 a) Photographie de grains de glace d'eau déposés par condensation de vapeur d'eau sur la plaque de cuivre froide. b) Photographie de la même zone avec des grains de dioxyde de carbone déposés par condensation et entourés en pointillés rouges pour plus de clarté. 182

IV.6 Photographie d'un mélange de grains d'eau et de dioxyde de carbone formés par condensation du gaz de CO_2 sur des grains d'eau introduits en chambre froide. Le spectre, à droite, a été acquis sur le mélange, à environ 120 K. 182

IV.7 a) Photographie de grains de glaces d'eau et de dioxyde de carbone déposés par condensation sur la plaque de cuivre froide. Les grains de dioxyde de carbone sont entourés en pointillés rouges pour plus de clarté. b) Photographie de la même zone après sublimation des grains de dioxyde de carbone. c) Spectre d'un mélange de grains d'eau et de dioxyde de carbone superposés. d) Spectre d'une zone de glace d'eau n'ayant pas été au contact de dioxyde de carbone solide. e) Signature spectrale d'une zone de glace d'eau ayant interagi avec un grain de dioxyde de carbone. 184

IV.8 Signature spectrale d'un mélange de glaces d'eau et de dioxyde de carbone à l'échelle microscopique. Mise en évidence de l'influence du dioxyde de carbone sur la signature spectrale a) entre 1 et 5 μm, b) entre 1,8 et 2,2 μm, c) entre 2,6 et 2,8 μm et d) entre 4,0 et 4,5 μm. 186

IV.9 Photographie d'un mélange de glaces d'eau et de dioxyde de carbone. Le carré au centre de l'image indique la position du spot d'acquisition. . 187

IV.10 Signature spectrale d'un mélange de glaces d'eau et de dioxyde de carbone à l'échelle macroscopique en noir. Spectre d'un échantillon de glace d'eau en rouge, à 80 K et 211 μm. Spectre d'un grain de dioxyde de carbone de 230 μm à 78,9 K, en vert 187

IV.11 a) Spectre d'un échantillon massif de clathrates de CO_2 fabriqué en autoclave et placé dans la coupelle d'analyse dans la chambre froide. b) Agrandissement de a entre 1,43 et 1,45 μm. c) Agrandissement de a entre 1,9 et 2,3 μm. d) Agrandissement de a entre 2,68 et 2,74 μm. Cette bande d'absorption est caractéristique des clathrates de dioxyde de carbone. e) Agrandissement de a entre 4,1 et 4,5 μm. 189

IV.12 Photographie de grains de clathrates de dioxyde de carbone broyés et tamisés en chambre froide acquise sous le microscope binoculaire à -20°C. La taille de grains de l'échantillon est d'environ 385 μm. 190

IV.13 a) Spectres d'un échantillon massif de clathrates de CO_2 de 272 μm à 110 K en bordeaux et d'un échantillon microscopique de 310 μm à 107 K en vert, synthétisés en autoclave, broyés, tamisés et placés dans leur coupelle d'analyse respective dans la chambre froide. b) Photographie du grain de clathrate de CO_2 associé au spectre vert de l'échantillon microscopique. c) Agrandissement de a entre 1,80 et 2,20 μm. La bande de CO_2 n'est que peu ou pas visible dans la forte absorption de l'eau à 2 μm. d) Agrandissement de a entre 2,60 et 2,90 μm. La bande caractéristique des clathrates de dioxyde de carbone à 2,708 μm est fortement visible dans l'échantillon microscopique mais reste observable dans l'échantillon macroscopique. 191

IV.14 a) Spectre d'un échantillon massif de clathrates de CO_2 synthétisé en laboratoire dans un autoclave et chargé dans la coupelle d'analyse en chambre froide. Cet échantillon n'a pas été contraint en taille de grains, la température d'acquisition est d'environ 80 K. b) Spectre de clathrates de CO_2 acquis en laboratoire par Smythe (1975). Les contraintes en taille de grains et en température ne sont pas connues. 195

IV.15 Spectres d'échantillons macroscopiques de glace d'eau et de clathrates de dioxyde de carbone de 385 μm, entre 1 et 5 μm, à 120 K. 196

IV.16 Spectres d'échantillons macroscopiques de glace d'eau et de clathrates de dioxyde de carbone de 385 μm, à 120 K. a) Agrandissement entre 1,00 et 1,10 μm, b) agrandissement entre 1,15 et 1,35 μm et c) agrandissement entre 1,35 et 1,85 μm. 197

IV.17 Spectres d'échantillons macroscopiques de glace d'eau et de clathrates de dioxyde de carbone de 385 μm, à 120 K. a) agrandissement entre 2,8 et 3,4 μm, b) agrandissement entre 3,4 et 4,1 μm. 197

IV.18 Spectres d'échantillons macroscopiques de glace d'eau et de clathrates de dioxyde de carbone de 385 μm, à 120 K. a) agrandissement entre 2,6 et 2,8 μm, b) agrandissement entre 4,1 et 4,4 μm. 198

IV.19 Aire de Riemann des bandes à 1,05, 1,30 et 1,50 μm en fonction de la taille de grains et de la température. 199

IV.20 Spectres d'échantillons microscopiques de glace de CO_2 (grain de 315 μm, à 80 K) et de clathrates de dioxyde de carbone (grain de 200 μm, à 115 K) et de dioxyde de carbone gazeux à 290 K. a) agrandissement entre 2,55 et 2,88 μm, b) agrandissement entre 4,15 et 4,40 μm. 201

IV.21 Résultats des caractéristiques des gaussiennes dont la somme est représentative de la bande des clathrates à 2,7 μm. a) Position des centres des deux gaussiennes en fonction de la température. b) Profondeur des deux gaussiennes en fonction de la température. c) Largeur des deux gaussiennes en fonction de la température. d) Aire des deux gaussiennes en fonction de la température. 203

IV.22 Aire de Riemann de la bande à 2,7 μm en fonction de la température. La pression dans le cryostat lors des expériences est notée à titre indicatif, la jauge de pression n'est pas très précise entre 10 et 100 mbar (30 % d'erreur). Les températures de dissociation ont également été notées pour chaque échantillon. 204

IV.23 Comparaison des spectres de glaces d'eau et de dioxyde de carbone pures et de mélange : a) entre 1 et 5 μm, b) entre 1,4 et 1,75 μm, c) entre 2,85 et 3,30 μm, d) entre 3,3 et 3,9 μm, e) entre 1,8 et 2,2 μm, f) entre 2,65 et 2,90 μm et g) entre 3,9 et 4,5 μm. 206

IV.24 Comparaison des spectres de mélange de glaces d'eau et de dioxyde de carbone pures et de clathrates à l'échelle microscopique : a) entre 1 et 5 μm, b) entre 1,4 et 1,75 μm, c) entre 2,85 et 3,30 μm, d) entre 3,3 et 3,9 μm, e) entre 1,8 et 2,2 μm, f) entre 2,65 et 2,90 μm et g) entre 3,9 et 4,5 μm. 208

IV.25 Comparaison des spectres de mélange de glaces d'eau et de dioxyde de carbone pures et de clathrates à l'échelle macroscopique : a) entre 1 et 5 μm, b) entre 1,4 et 1,8 μm, c) entre 2,8 et 3,30 μm, d) entre 3,3 et 3,9 μm, e) entre 1,8 et 2,2 μm, f) entre 2,65 et 2,85 μm et g) entre 3,9 et 4,5 μm. 210

V.1 a) Carte de distribution en température de l'image CM_1500061286_1·cub. b) Carte de distribution en taille de grains de la même image VIMS. . . 217

V.2 Carte ISS d'Encelade, 110 m par pixel. D'après Roatsch et al. (2008). . 219

V.3 a) Image issue du cube hyperspectral CM_1500061286_1·cub. Le composé couleur est réalisé à partir des bandes 125, 135 et 165 ; soit 1,3432, 1,5079 et 2,0017 μm. Les zones rouges-marron correspondent aux acquisitions sur ou proches des Tiger Stripes. Pour plus de clarté, ces pixels ont été marqués d'une croix bleue. Les barres d'échelle représentent les numéros des pixels. b) Carte de la distribution en taille de grains selon la même grille de pixels que l'image a. La position des Tiger Stripes est reportée grâce aux croix bleues. Les couleurs de la carte de taille de grains montrent que les grains de glace sont plus gros au niveau des Tiger Stripes, ce qui a déjà été remarqué par Jaumann et al. (2008). c) La carte en deux dimensions a été projetée, grâce aux informations des fichiers de navigation, sur la carte ISS présentée dans la figure V.2. Les croix bleues ont été reportées selon les coordonnées des pixels. Un décalage d'un pixel en diagonale est remarqué entre les croix bleues qui représentent les Tiger Stripes sur les pixels et les traits en pointillés qui sont les Tiger Stripes sur la carte ISS. 220

V.4 Carte de température du pôle Sud d'Encelade obtenue par des calculs relatifs aux aires réduites des spectres. Les points de température en noir sont issus des données de Spencer et al. (2006). 221

V.5 Carte de taille de grains du pôle Sud d'Encelade obtenue par des calculs relatifs aux aires et aires réduites des spectres. 222

V.6 a) Image de la bande 92 à 1,5110 μm du cube hyperspectral de NIMS e6e007ci. La zone notée E est une unité spectrale définie par McCord et al. (2010). b) Spectre brut associé à l'unité E. La bande autour de 2,7 μm est clairement visible sur cette zone. Une double bande est également observable à 4,2256 et 4,2782 μm, positions spectrales des canaux NIMS. 232

V.7 a) Image de la bande 208 à 2,712 μm du cube hyperspectral de VIMS, CM_1500061286_1·cub. b) Spectre moyen calculé sur l'ensemble des données brutes des pixels associés aux Tiger Stripes. La bande à 2,7 μm est légèrement visible sur ce spectre. Une large bande est également observable à 4,2784 μm, position spectrale du canal VIMS. 234

V.8 Spectre moyen calculé sur 134 pixels de Phoebe, d'après Clark et al. (2005b). f24 indique une bande d'absorption à 2,72 μm clairement visible sur ce spectre. 235

Liste des tableaux

I.1 Caractéristiques des différentes phases de glace 22

I.2 Caractéristiques des différentes structures de clathrates 39

II.1 Tailles et références des tamis 92

II.2 Background des constituants étudiés 112

III.1 Description des données expérimentales 142

III.2 Valeurs des coefficients $X^i_{0,k}$, $a^i_{T,k}$, et $a^i_{D,k}$ de chaque critère de chaque gaussienne 152

III.3 Moyenne et écart type des différences entre les valeurs mesurées et calculées 153

III.4 Valeurs des coefficients $X^i_{0,k}$, $a^i_{T,k}$, et $a^i_{D,k}$ de chaque critère de chaque gaussienne 154

III.5 Moyenne et écart type des différences entre les valeurs mesurées et calculées 155

III.6 Valeurs des coefficients des équations de dépendance en taille de grains 165

III.7 Valeurs des coefficients des équations de dépendance en température et en taille de grains 166

III.8 Moyenne et écart type des différences entre les valeurs mesurées et calculées 167

III.9 Caractéristiques spectrales de la glace d'eau (210 μm, 80 K). 169

IV.1 Longueurs d'onde de vibration des constituants étudiés dans ce chapitre 211

IV.2 Longueurs d'onde de vibration du dioxyde carbone gazeux, solide et piégé dans un structure clathrate de la littérature. Les positions de la bande d'absorption représentatives du dioxyde de carbone sur les satellites de glace sont indiquées pour comparaison. 212

Introduction

Un certain nombre de satellites gravitent autour des planètes gazeuses du système solaire. Á cause de leurs dimensions et de leur composition, ils forment un groupe d'objets distincts dans le système solaire : les satellites de glace. Ceux explorés dans cette étude tournent autour de Jupiter et de Saturne. Les missions Galileo et Cassini sont allées à la rencontre des systèmes de Jupiter et de Saturne. Les spectro-imageurs embarqués à leur bord, respectivement, NIMS et VIMS ont analysé les surfaces des satellites de glace en spectroscopie infrarouge. La quantité de données acquises par ces missions est importante. Le travail de traitement des données a commencé depuis plus de dix ans et continuera encore pendant plusieurs décennies, en attendant d'autres missions.

Callisto et Ganymède sont deux satellites de Jupiter qui présentent des surfaces fortement cratérisées, et constituées de mélanges de glace d'eau et d'autres composants comme le dioxyde de carbone (Carlson et al., 1996). Europe est le troisième satellite jovien étudié dans ce travail. De nombreuses lignes se dessinent à sa surface, très lisse. Les sels hydratés ont des signatures infrarouges similaires à celles détectées sur Europe. Aussi, la composition de la croûte de glace d'Europe est supposée être principalement de la glace d'eau et des sels hydratés. Plusieurs satellites saturniens font également l'objet de cette étude. La plupart de ces satellites ont été formés quelques millions d'années après la naissance de Saturne, il y a environ 4,5 milliards d'années. Certains des plus pe-

tites lunes ont pu être capturées (comme Phoebe, Clark et al. (2005b); Cruikshank et al. (2008)) ou formées plus récemment, il y a 10 millons d'années (Charnoz et al., 2010). Leur surface présente des caractéristiques diverses et variées. Encelade dont la particularité est la présence de geysers à son pôle sud, a une surface constituée de glace d'eau quasiment pure. D'autres lunes de Saturne comme Phoebe, Hypérion ou Japet, sont plus brièvement étudiées. Leur surface est principalement constituée de glace d'eau, mélangée à de nombreux autres constituants mineurs comme des hydrocarbures (Clark et al., 2005b; Buratti et al., 2008; Coradini et al., 2008; Cruikshank et al., 2007, 2008).

Dans ce travail, la signature infrarouge de la glace d'eau cristalline a été étudiée expérimentalement de manière très approfondie. Les données de laboratoire ont permis d'établir une loi qui relie les caractéristiques spectrales de la signature infrarouge de la glace d'eau aux paramètres température et taille de grains. Cette étude qui représente une partie importante de ce sujet, est reliée au pôle sud d'Encelade. L'influence du dioxyde de carbone sur la signature spectrale de la glace d'eau a été étudiée expérimentalement par des mélanges et des synthèses de clathrates de dioxyde de carbone. Les clathrates sont des structures particulières dans lesquelles la glace d'eau forme des cages qui renferment des molécules, comme le dioxyde de carbone. Les mélanges et les clathrates expliquent comment le dioxyde de carbone peut être détecté à la surface des lunes de glace. En effet, isolé, le dioxyde de carbone n'est pas stable à la surface des satellites à cause des faibles pressions.

La glace d'eau est présente sur la quasi-totalité des lunes de Jupiter et de Saturne. La compréhension approfondie de sa structure, de sa stabilité et de ses interactions avec les autres constituants est essentielle pour avancer dans l'exploration de notre système solaire. De même, le dioxyde de carbone est important à étudier. En effet, le dioxyde de carbone pure sous forme condensée, à des températures similaires à celles mesurées

à la surface des satellites galiléens et saturniens, est métastable sur le long terme (Lebofsky, 1975; Palmer et Brown, 2006, 2008), ce qui indique les conditions spécifiques de sa formation et de son actuelle existence (Cruikshank et al., 2010). De plus, au sens chimique, le dioxyde de carbone fournit une porte d'accès à la formation de molécules organiques simples et complexes (Delitsky et Lane, 2002).

Les constituants, détectés à la surface d'Encelade et d'Europe, sont supposés provenir de leur intérieur. Les modèles actuels suggèrent que ces deux satellites possèdent un océan liquide sous la croûte de glace. Des constituants, remontés des profondeurs de l'océan, interagissent avec leur croûte de glace pour finir en surface, là où nos appareils les détectent. Ainsi, l'étude des compositions des surfaces des satellites permet de contraindre les théories et les modèles sur les intérieurs. En outre, la présence d'un océan sous la surface laisse imaginer la possibilité de l'existence d'une vie extraterrestre évoluant dans cet environnement depuis sa formation. Cependant, les mécanismes à l'origine de la vie et le temps requis à son apparition restent encore inconnus à l'heure actuelle. Combien de temps doit exister un environnement propice au développement de la vie pour qu'elle commence ? Quoi qu'il en soit, l'analyse des particules à la sortie des jets d'Encelade montre la présence d'éléments biogéniques (Carbone, Hydrogène, Azote, Oxygène, Phosphore et Soufre), mais l'existence d'un écosystème n'est envisageable qu'avec une source d'énergie (comme le Soleil pour la Terre, même pour les écosystèmes en subsurface). Cependant, le Soleil n'est pas la seule source d'énergie. Un type d'écosystème, découvert dans les basaltes du Columbia par Stevens et McKinley (1995), utilise une source d'énergie issue de la méthanogénèse pour se développer. Le dihydrogène, produit par des réactions entre l'eau et la roche, ainsi que le dioxyde de carbone alimentent directement la méthanogénèse qui forme du méthane et une biomasse, agissant comme les producteurs primaires de l'écosytème. Par ailleurs, McCol-

lom (1999) considère une biosphère méthanogène sur Europe comme des bactéries réductrices de soufre. L'existence de ces écosystèmes dans Encelade et Europe est remise en question car la croûte de glace en surface empêcherait l'apport d'oxydants dont dépend la survie de la biosphère à long terme (McKay et al., 2008). Pourtant, Parkinson et al. (2008) pensent que les cycles géochimiques dans Encelade suffisent au maintien de la vie. Les geysers d'Encelade sont donc explorés minutieusement de manière à détecter des traces de vie dans l'aquifère en subsurface.

Cette thèse se décompose en cinq chapitres. D'abord, le contexte planétologique est exposé dans le premier chapitre. Les missions d'exploration, les instruments et les constituants étudiés dans ce travail sont détaillés dans un premier temps. Les caractéristiques géologiques et compositionelles des surfaces des différentes lunes de glace qui font l'objet de l'étude sont présentées dans un second temps. Ensuite, dans le second chapitre, l'appareillage expérimental et les instruments de mesure sont décrits, puis les bases de la spectroscopie infrarouge et les méthodologies de traitement de données sont expliquées. Dans les chapitres III et IV, les résultats expérimentaux obtenus sur les études de la glace d'eau pure et sur l'influence du dioxyde de carbone sur la signature spectrale proche infrarouge de la glace d'eau sont exposés après la description des protocoles expérimentaux. Ces résultats ont, entre autres, permis d'élaborer une loi de dépendance des caractéristiques de la signature spectrale infrarouge de le glace d'eau en fonction de la température et de la taille de grains. Finalement, ces résultats sont exploités dans le dernier chapitre pour déterminer des cartes de température et de taille de grains de la surface du pôle Sud d'Encelade, puis pour discuter de la présence et de l'état physique du dioxyde de carbone détecté à la surface des lunes de glace.

Chapitre I

Contexte de l'étude

L'exploration du système solaire a commencé, il y a des milliers d'années, depuis la Terre avec nos yeux. Plus les progrès techniques avancent, plus l'homme peut être précis dans l'observation de l'espace. Ainsi, il a remplacé ses yeux par des télescopes et puisque ce n'était pas encore assez précis, il est allé sur place, pour le corps le plus proche qu'est notre Lune, ou a envoyé des sondes spatiales. Les missions se sont succédées pour observer les différentes planètes de notre système. Deux, parmi de nombreuses autres sont au centre de ce travail : les missions Galileo et Cassini qui permettent d'étudier au plus près les systèmes jovien et saturnien. Leurs satellites ont une surface principalement composée de glace d'eau, mais de nombreux autres constituants ont été identifiés. Ce premier chapitre, composé de deux parties, présentera d'abord les missions, les instruments et les glaces d'intérêt planétologique puis les lunes au centre de ce travail.

I.1 Contexte planétologique

Cette première section est consacrée, dans un premier temps, à la description des missions Cassini et Galileo qui ont permis d'obtenir une quantité très importante de données en spectroscopie infrarouge des satellites de glace de Saturne et de Jupiter. Dans un second temps, les objectifs des spectro-imageurs de chaque mission seront présentés. Finalement, les différentes glaces d'interêt planétologique seront exposées.

I.1.1 Les missions Cassini-Huygens et Galileo

Les différentes missions envoyées dans l'espace pour étudier les planètes et les corps qui les entourent, permettent un retour d'informations essentielles pour la compréhension de l'origine du système solaire. Les deux missions, Cassini et Galileo, ont fourni des données précieuses sur les systèmes jovien et saturnien.

Cassini-Huygens

Le système saturnien est composé d'une soixantaine de satellites qui gravitent autour de Saturne. La mission Cassini-Huygens étudie ce système depuis 2004. Cassini-Huygens est une mission spatiale commune entre la NASA (National Aeronautics and Space Administration) et l'ESA (European Space Agency). La collaboration de seize pays européens et des Etats-Unis a rendu possible la construction d'une mission aussi audacieuse. L'orbiteur, nommé Cassini (astronome Italien-Français), a été construit par la NASA et la sonde, Huygens (physicien, mathématicien et astronome Néerlandais), a été développée par l'ESA. L'orbiteur et la sonde ont été assemblés au JPL (Jet Propulsion Laboratory) aux Etats-Unis et ont quitté la Terre le 15 Octobre 1997 depuis Cap Canaveral pour pénétrer, après un long périple interplanétaire de sept ans, dans le sys-

tème saturnien le 1 Juillet 2004. Six mois plus tard, la sonde, Huygens, s'est séparée de l'orbiteur, le 25 Décembre 2004, pour s'approcher et se poser sur Titan, le plus gros satellite de Saturne, le 14 Janvier 2005. Cette sonde a permis l'étude de l'atmosphère de Titan lors de sa descente vers la surface du satellite. Des photographies de la surface titanienne ont permis d'observer un réseau fluvial et la morphologie du sol près du site d'atterissage. La mission nominale devait s'achever en juin 2008 mais elle a maintenant été étendue jusqu'en 2017 avec la « Cassini Solstice Mission ».

Les sept principaux objectifs de la mission sont :

- de déterminer la structure tridimensionnelle et le comportement dynamique des anneaux de Saturne.
- de déterminer la composition des surfaces des satellites de Saturne et chacune de leur histoire géologique.
- de déterminer la nature et l'origine des matériaux sombres de la première face de Japet.
- de mesurer la structure tridimensionnelle et le comportement dynamique de la magnétosphère de Saturne.
- d'étudier le comportement dynamique de l'atmosphère de Saturne au niveau des nuages.
- d'étudier la variabilité des nuages et de la brume de Titan.
- de caractériser la surface de Titan à l'échelle locale.

Cassini, présenté sur la figure I.1a, est le plus grand et le plus complexe des orbiteurs jamais construit jusqu'à ce jour. Il pèse 2 150 kg pour 6,8 m de long et 4 m de large, et la sonde, Huygens, quant à elle, pèse 350 kg. L'orbiteur est alimenté par trois générateurs thermoélectriques à radioisotopes qui utilisent la chaleur de la désintégration radioactive naturelle du plutonium 238 générant directement de l'électri-

cité via des thermocouples. A son bord, Cassini possède une douzaine d'instruments scientifiques sur trois grandes catégories de domaines d'étude décrits sur http ://saturn.jpl.nasa.gov/spacecraft/cassiniorbiterinstruments/ :

- **Mesures optiques à distance**

  Installés sur la platine de mesure à distance, ces instruments permettent l'étude de Saturne, de ses anneaux et de ses lunes grâce aux spectres électromagnétiques.
  - *Composite Infrared Spectrometer (CIRS)*, figure I.1b (Flasar et al., 2004).
  - *Imaging Science Subsystem (ISS)*, figures I.1c et I.1d (Porco et al., 2004).
  - *Ultraviolet Imaging Spectrograph (UVIS)*, figure I.1e (Esposito et al., 2004).
  - *Visual and Infrared Mapping Spectrometer (VIMS)*, figure I.1f (Brown et al., 2004).
- **Champs, Particules et Ondes**

  L'ensemble de ces instruments sert à étudier les poussières, les plasmas et les champs magnétiques autour de Saturne. Plusieurs de ces instruments ne produisent pas d'images, en revanche, les informations fournies par ces appareils est capitale pour la compréhension scientifique de l'environnement saturnien.
  - *Cassini Plasma Spectrometer (CAPS)*, figure I.1g (Young et al., 2004).
  - *Cosmic Dust Analyzer (CDA)*, figure I.1h (Srama et al., 2004).
  - *Ion and Neutral Mass Spectrometer (INMS)*, figure I.1i (Waite et al., 2004).
  - *Magnetometer (MAG)*, figure I.1j (Dougherty et al., 2004).
  - *Magnetospheric Imaging Instrument (MIMI)*, figure I.1k (Krimigis et al., 2004).
  - *Radio and Plasma Wave Science (RPWS)*, figure I.1l (Gurnett et al., 2004).
- **Mesure à distance des micro-ondes**

  Ces instruments utilisent les ondes radio pour cartographier les atmosphères, dé-

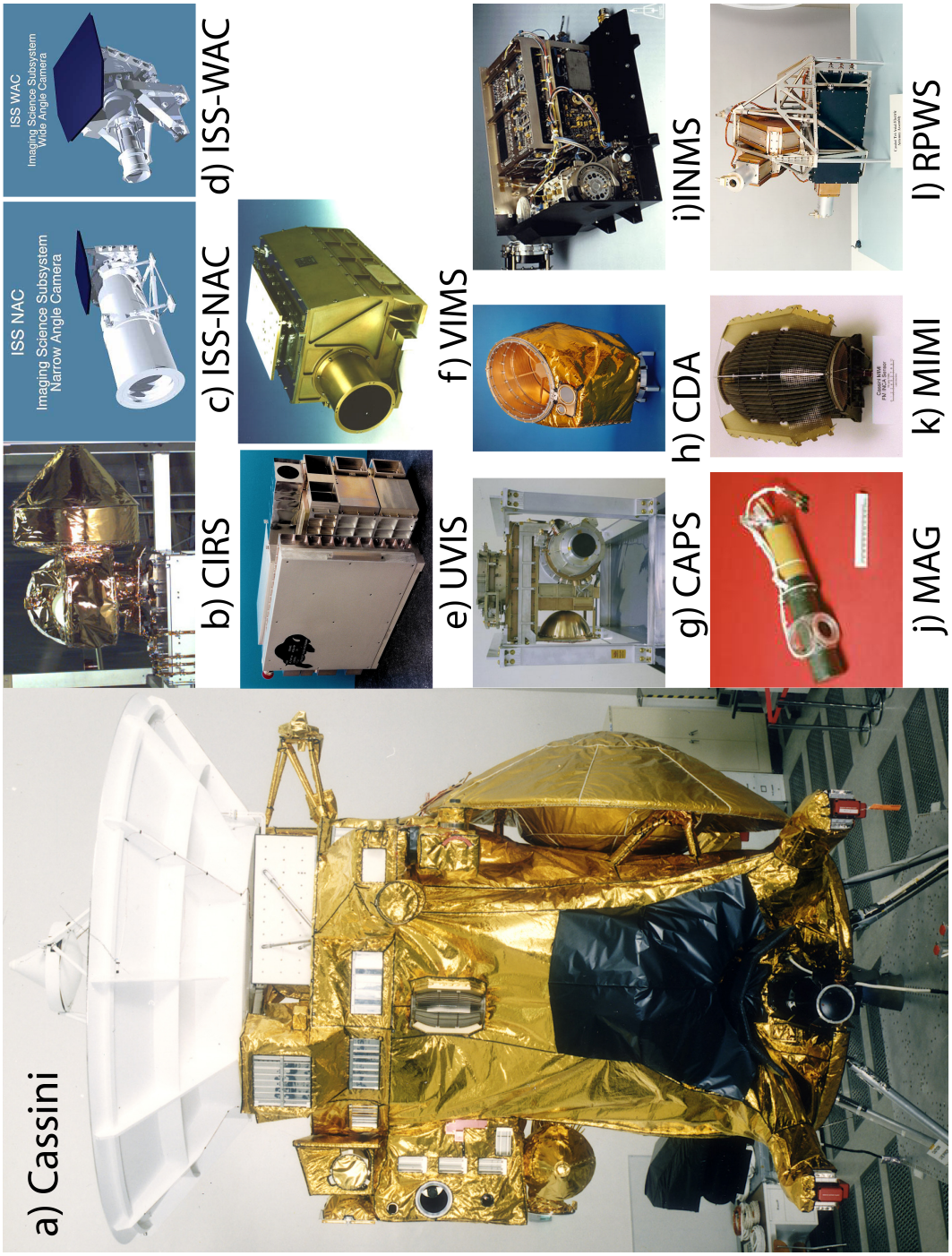


FIGURE I.1 – a) L'orbiteur Cassini et quelques instruments, b) *Composite Infrared Spectrometer*, c) *Imaging Science Subsystem* à angle étroit, d) *Imaging Science Subsystem* à grand angle, e) *Ultraviolet Imaging Spectrograph*, f) *Visual and Infrared Mapping Spectrometer*, g) *Cassini Plasma Spectrometer*, h) *Cosmic Dust Analyzer*, i) *Ion and Neutral Mass Spectrometer*, j) *Magnetometer*, k) *Magnetospheric Imaging Instrument* et l) *Radio and Plasma Wave Science*.

terminer la masse des lunes, collecter des données sur la taille des particules des anneaux de Saturne et sonder la surface de Titan.

– *Radar* (Elachi et al., 2004).

– *Radio Science (RSS)* (Kliore et al., 2004).

Galileo

Le système de Jupiter a été exploré pendant huit ans grâce à la mission Galileo. D'autres missions d'exploration sont en cours de développement pour répondre aux nouvelles questions posées par Galileo, et principalement sur le thème de l'habitabilité dans les océans liquides des satellites joviens. Galileo, nommé d'après l'astronome Galileo Galilei, est un orbiteur envoyé dans l'espace le 18 Octobre 1989 par la navette spatiale Atlantis. Les objectifs de l'orbiteur, décrits par Meltzer (2007), étaient de définir la topologie et les dynamiques de la magnétosphère extérieure de Jupiter ainsi que de décrire la nature de l'émission de particules magnetosphériques, de déterminer la répartition et la stabilité des radiations piégées, d'étudier l'interaction entre les satellites et la magnétosphère, de déterminer l'état physique, la morphologie et la composition de la surface des satellites, de mesurer les propriétés magnétiques, gravitationnelles et thermiques des satellites pour obtenir leurs caractéristiques géophysiques. L'étude des ionosphères et des atmosphères des satellites était également au programme.

Galileo, figure I.2a, est arrivé dans le système jovien le 7 Décembre 1995. Au cours de son trajet, Galileo a pu observer Vénus (le 10 février 1990), la Terre à deux reprises (les 8 Décembre 1990 et 1992), plusieurs astéroïdes (951 Gaspra, le 29 Octobre 1991 et 243 Ida, le 28 Août 1993, ainsi que son satellite naturel Dactyl qu'il a découvert). Galileo a pu également observer le crash d'un fragment de la comète Shoemaker-Levy 9 sur Jupiter en 1994. La mission nominale de Galileo avait une durée de deux ans pendant

lesquels, l'orbiteur voyageait à travers le système jovien pour observer et étudier Jupiter et ses lunes. A la fin de cette période, une mission étendue a été autorisée à partir du 7 Décembre 1997. De nombreux survols de Io et d'Europe ont été effectués dont un à l'altitude de seulement 180 km, le 15 Octobre 2001. Le niveau extrême des radiations, en particulier au voisinage de Io a fait que les survols de Io ont été repoussés à la fin de la mission, quand la perte de la sonde était devenue acceptable. Les instruments scientifiques qui mesuraient les champs et les particules étaient installés sur un support rotatif de l'orbiteur avec l'antenne principale, la source d'énergie, le module de propulsion et la plupart des ordinateurs et des éléments électroniques de Galileo. Les dix intruments de l'orbiteur, pour un total de 118 kg, étaient un magnétomètre au bout d'un bras de 11 m, deux instruments à plasma pour les particules chargées à basse énergie et pour les ondes plasma générées par les particules, un détecteur à particules à haute énergie et un détecteur à poussières cosmiques et joviennes. L'orbiteur a également embarqué un compteur à ions lourds, un appareil expérimental qui évalue l'environnement de particules chargées dont la présence serait potentiellement dangeureuse et un détecteur d'ultraviolet extrême associé au spectromètre UV sur la plateforme d'analyse. Le système de caméra était placé sur une partie non rotative de Galileo ainsi que le spectromètre-imageur en proche infrarouge, le spectromètre ultraviolet et le radiomètre photo-polarimètre. Le système de caméra pouvait acquérir des images dont la résolution était de 20 à 1 000 fois meilleure que Voyager. Le capteur CCD de la caméra de Galileo avait une meilleure sensibilité et une gamme plus large de détection de couleur que Voyager car l'orbiteur volait plus près de la planète géante et de ses lunes internes.

Des explications sur la mission Galileo restent disponibles sur http ://solarsystem.nasa.gov/galileo/index.cfm

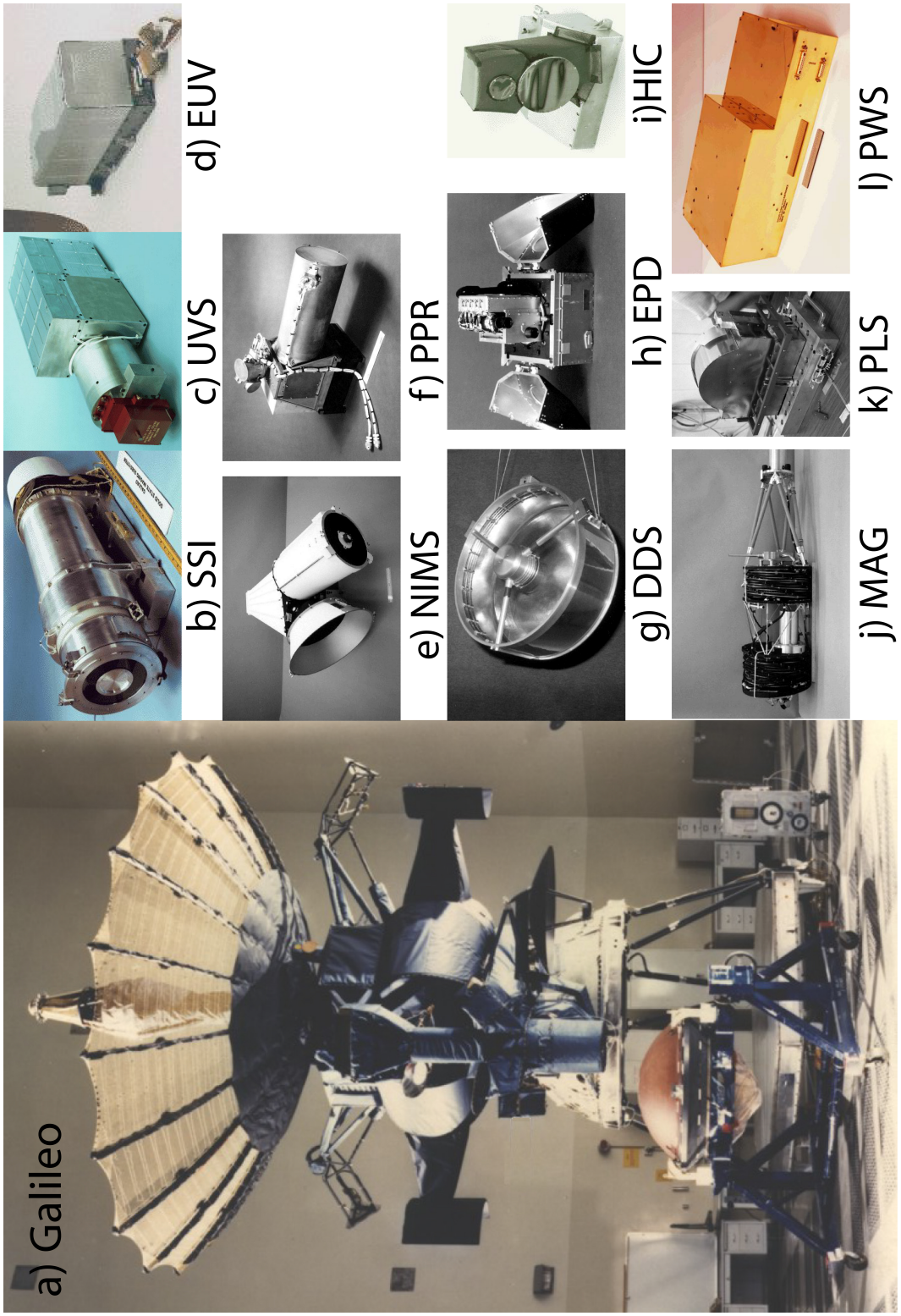


FIGURE I.2 – a) Photographie de Galileo et de l'ensemble de ses instruments, b) *Solid State Imaging*, c) *UltraViolet Spectrometer*, d) *Extreme UltraViolet Spectrometer*, e) *Near Infrared Mapping Spectrometer*, f) *PhotoPolarimeter-Radiometer*, g) *Dust Detector Subsystem*, h) *Energetic Particles Detector*, i) *Heavy Ion Counter*, j) *MAGnetometer*, k) *PLasma Subsystem* et l) *Plasma Wave Subsystem*.

Quatre instruments étaient placés sur la partie non-rotative de Galileo :

- *Solid State Imaging (SSI)*, figure I.2b
- *Near Infrared Mapping Spectrometer (NIMS)*, figure I.2e
- *UltraViolet Spectrometer and Extreme UltraViolet Spectrometer (UVS et EUV)*, figures I.2c et GalileoInstrumentsd
- *PhotoPolarimeter-Radiometer (PPR)*, figure I.2f

Six instruments étaient intégrés sur un support rotatif de l'orbiteur :

- *Dust Detector Subsystem (DDS)*, figure I.2g
- *Energetic Particles Detector (EPD)*, figure I.2h
- *Heavy Ion Counter (HIC)*, figure I.2i
- *MAGnetometer (MAG)* figure I.2j
- *PLasma Subsystem (PLS)*, figure I.2k
- *Plasma Wave Subsystem (PWS)*, figure I.2l

Ces instruments ont permis une étude aussi détaillée que possible du système de Jupiter. A son arrivée dans le système jovien, le 7 Décembre 1995, l'orbiteur Galileo a effectué 35 orbites autour de Jupiter pendant près de huit ans de mission. Galileo a été détruit lors d'un impact contrôlé avec Jupiter le 21 Septembre 2003 pour éliminer le risque d'un impact avec Europe qui aurait pu contaminer le satellite.

Les résultats scientifiques obtenus par cette mission ont répondu à certaines questions et en ont apporté bien d'autres.

- Galileo a observé pour la première fois des nuages d'ammoniac dans l'atmosphère d'une autre planète. L'atmosphère crée des particules de glace d'ammoniac à partir de matériaux remontés des profondeurs.
- L'activité volcanique étendue du satellite Io a été confirmée. Elle est 100 fois plus importante que celle trouvée sur Terre. La chaleur et la fréquence des éruptions

sont considérées comme équivalentes à celles de l'ère primaire de la Terre.

- Les interactions complexes du plasma dans l'atmosphère de Io créent un immense champ électrique couplé à l'atmophère de Jupiter.
- Plusieurs preuves issues de Galileo mettent en avant la théorie de l'existence d'un océan liquide sous la croûte de glace d'Europe.
- Ganymède possède son propre champ magnétique, c'est le premier satellite connu a en avoir un.
- Les données magnétiques de Galileo fournissent des preuves d'une couche d'eau salée liquide sous la surface visible de Ganymède, Callisto et Europe.
- Ganymède, Callisto et Europe possèdent une fine couche atmosphérique.
- Le système d'anneaux de Jupiter est formé par des poussières issues de collisions entre les météorites interplanétaires et la surface des quatre lunes internes de la planète géante. L'anneau le plus externe est composé de deux anneaux entrelacés. Un anneau le long de l'orbite d'Amalthéa, le troisième satellite de Jupiter, existe probablement.
- L'orbiteur Galileo a identifié une struture globale et la dynamique de la magnétosphère de Jupiter.

I.1.2 Les spectro-imageurs VIMS et NIMS

Le « *Visual and Infrared Mapping Spectrometer* », VIMS, a été embarqué sur Cassini et le « *Near Infrared Mapping Spectrometer* », NIMS, sur Galileo. Ces intruments sont des spectro-imageurs qui observent les surfaces des satellites de glace dans le visible et le proche infrarouge et qui ont permis d'effectuer des cartes des objets étudiés utilisées pour les applications de cette étude.

VIMS

L'instrument de mesure, VIMS, est une amélioration de spectro-imageurs précédemment conçus. VIMS a été spécialement adapté à l'exploration planétaire, (Wellman et al., 1987), et né d'un programme réunissant plusieurs pays, l'instrument vise l'étude conjointe de divers objets du système saturnien (Juergens et al., 1991). Le spectromètre imageur, VIMS, est constitué de deux systèmes optiques coordonnés par une unité électronique commune qui opèrent en tandem. Ce système optique combiné génère 352 images bidimensionnelles simultanément, chacune dans une longueur d'onde voisine. Les images peuvent avoir une dimension de 64 par 64 pixels. Leur combinaison crée un « cube d'image » dans lequel chaque pixel d'image représente un spectre dont le domaine spectral est compris entre 350 et 5100 nm sur 352 canaux (Miller et al., 1996). Le principal usage du spectro-imageur est de fournir des images multispectrales en deux dimensions de haute résolution. Ces images permettront des études détaillées de la composition et de la répartition des matériaux en surface des lunes de Saturne, de la structure ainsi que de la composition de l'atmosphère puis des nuages de Saturne et de Titan, et de la nature ainsi que de la composition des anneaux de Saturne. La combinaison d'une haute résolution spatiale et spectrale permet d'obtenir des identifications de matériaux et des structures en surface. Les objectifs scientifiques de l'instrument sont détaillés sur les quatre objets d'étude principaux (NASA, 1990; Buratti, 1993; Walch et al., 1992) :

– **Les satellites de glace saturniens**

  Les objectifs sont d'établir des corrélations entre la composition, la répartition des matériaux en surface et la morphologie observée et de comprendre les propriétés photométriques et thermiques.

– **Les anneaux de Saturne**

  Les objectifs sont de connaître leur composition, d'observer leur morphologie, d'évaluer la répartition de la taille de grains de la glace et des poussières, d'établir des profils de profondeur optique radiale des anneaux, d'étudier la variation dans le temps de la composition et de la structure des anneaux et de déterminer une corrélation entre la composition des satellites et celle des anneaux.

– **Saturne**

  Les objectifs sont d'étudier les structures atmosphériques (nuages, vents, tourbillons, éclairs...) de Saturne ainsi que sa structure interne.

– **Titan**

  Contrairement aux autres satellites de glace, les objectifs de l'étude de Titan concernent, non seulement la géologie et la géomorphologie des surfaces mais aussi de la composition et de la répartition des espèces atmosphériques et des aérosols ainsi que le climat de Titan.

NIMS

Le spectro-imageur dans le proche infrarouge de Galileo est une combinaison de méthodes d'imagerie et de spectroscopie. L'utilisation simultanée de ces deux méthodes nécessite une énergie bien plus importante que leur utilisation individuelle (Carlson et al., 1992). NIMS est un instrument idéal pour les études géologiques des surfaces. Le spectro-imageur peut créer des cartes des caractéristiques morphologiques en même temps qu'il détermine leur composition et leur minéralogie, fournissant ainsi des données sur l'évolution des surfaces géologiques. De plus, des phénomènes transitoires des atmosphères ont été trouvés et analysés spectroscopiquement (Carlson et al., 1992). Ainsi, les aspects spatial et compositionnel des caractéristiques connues ont pu être

complètement étudiés. NIMS fut conçu pour observer Jupiter et ses lunes ainsi que Vénus pour un passage, le système Terre-Lune à deux reprises et deux astéroïdes. Le spectro-imageur, NIMS, possède des résolutions spatiale et spectrale modestes et acquiert des spectres entre 700 et 5200 μm. Ce domaine spectral a permis l'observation et la détermination de minéraux dont la présence était suspectée à la surface des planètes et des lunes. Les objectifs de cet appareil étaient multiples et concernaient différentes planètes :

- **Vénus**

  Pendant le survol de Vénus en Février 1990, les mesures de NIMS étaient concentrées sur les caractéristiques spectrales issues de la surface et de l'émission thermique de l'atmosphère profonde de Vénus. Galileo a réalisé des cartes du côté nuit de Vénus avec des résolutions de trois à six fois meilleures que celles des télescopes terrestres (Allen et Crawford, 1984; Johnson et al., 1991; Carlson et al., 1991). Deux types de mesures ont été obtenus de NIMS (Carlson et al., 1991) : i) des images spatiales à des longueurs d'onde infrarouges sélectionnées et ii) des spectres détaillés fournissant des informations chimiques importantes, particulièrement sur l'eau et le monoxyde de carbone contenus dans l'atmosphère profonde de Vénus. Le survol de Galileo sur Vénus a permis de détecter des éclairs et les interactions de la planète avec le vent solaire. Par ailleurs, une collection de données hautes résolutions du côté nuit indique l'existence de nuages de forte opacité dont la morphologie change de manière significative sur un an (Meltzer, 2007).

- **Le système Terre - Lune**

  Pendant le premier survol du système Terre - Lune, NIMS a effectué des images spectrales de l'atmosphère et de la surface des deux corps. L'étude de l'atmosphère de la Terre a permis de comprendre l'effet néfaste des émissions anthropo-

logiques de méthane sur la couche d'ozone (Thomas et al., 1989). L'observation de la Terre, par NIMS, a également été considérée comme un test dans la détection de la vie. Les critères de sa détection sont basés sur la présence d'eau, et sur le taux de méthane (CH_4), d'oxyde nitrique (N_2O), et d'oxygène (O_2) contenus dans l'atmosphère (Sagan et al., 1993). L'analyse de la surface de la Terre, dans les régions les moins peuplées de la planète (Australie et Antarctique, 6% de la surface de la Terre), n'avait pas permis de détecter la présence de la vie (Sagan et al., 1993; Meltzer, 2007). La meilleure indication de l'existence de la vie sur Terre était, finalement, les émissions d'ondes radio, (Sagan et al., 1993). La mission Galileo a permis la première observation spectrale de la Lune (Sawyer, 1990). De plus, les observations des flux de lave lunaires indiquent la présence d'un volcanisme intense et étendu durant les premières années de son existence.

– **Les astéroïdes**

  Galileo, au cours de son trajet vers le système jovien, a pu observer deux astéroïdes, Gaspra et Ida, respectivement le 29 Octobre 1991 et le 28 Août 1993. Les études de leur surface ont montré qu'ils étaient tous les deux des astéroïdes de type S dont les roches sont riches en silicates. Ces corps sont brillants (albédo 0,10-0,22) et présentent une phase de nickel et de fer mélangée avec des silicates de fer et de magnésium. L'observation de Gaspra a révélé une surface cratérisée et de forme irrégulière qui suggère de nombreuses collisions avec d'autres corps. Ida, plus gros que Gaspra, est également fortement cratérisé, plus que l'astéroïde précédent, ce qui évoque une formation antérieure à celle de Gaspra (Meltzer, 2007; Williams, 1996).

– **L'atmosphère de Jupiter**

  NIMS a été conçu pour étudier, en partie, l'atmosphère de Jupiter. Sa gamme

spectrale d'étude lui permet d'observer des composants tels que le germane (ou tétrahydrure de germanium, GeH_4), la phosphine (ou hydrure de phosphore, PH_3) ou encore l'eau contenus dans l'atmosphère de Jupiter, ainsi que des molécules telles que le méthane (CH_4), l'ammoniac (NH_3) et le dihydrogène (H_2). Sa résolution spatiale est suffisante pour observer les changements dans le temps de la plupart des phénomènes atmosphériques de Jupiter et la gamme d'angle de phase disponible peut couvrir l'étude des propriétés microphysiques des différentes couches de nuages. La formation d'un orage tourbillonnant beaucoup plus important que sur Terre a pu être examinée (Roos-Serote et al., 1999, 2000).

– **Les satellites Galiléens**

Les objectifs scientifiques de NIMS quant à l'étude des trois satellites de glace galiléens sont d'une part de réaliser des cartes des multiples unités de différentes compositions et, d'autre part, d'identifier leur composition élémentaire et minéralogique (Carlson et al., 1992). La surface d'Europe est observée avec plusieurs instruments, (Fanale et al., 1999), les images visibles obtenues montrent un sol très fracturé. Au niveau de ces fractures, la présence de sels hydratés est fortement présumée (McCord et al., 1998b, 1999). D'autres composés chimiques sont détectés comme le péroxyde d'hydrogène ou de l'acide sulfurique, (Carlson et al., 1999b), ou sont recherchés, comme les clathrates de dioxyde de carbone (Prieto-Ballesteros et al., 2005). McCord et al. (1997) ont déterminé la présence de divers composants à la surface de Ganymède et de Callisto. NIMS a permis d'identifier des constituants tels que le dioxyde de carbone, des matériaux organiques (comme les tholins, contenant des triples liaisons entre le carbone et l'azote et des liaisons carbone hydrogène), du dioxyde de soufre et des composants contenant un groupe fonctionnel -SH. Cependant, chaque spectre indique la glace d'eau ou

des minéraux hydratés comme les constituants de la première couche (McCord et al., 1997). Les satellites galiléens sont décrits de manière plus détaillée dans la section suivante.

Les données obtenues par cet instrument sont similaires à celles obtenues par VIMS, en ce qui concerne le format. Ce sont donc des cubes de données, une image est une série d'acquisition de plusieurs longeurs d'onde et chaque pixel spatial d'une image contient l'ensemble de l'information spectrale, *i.e.* un spectre moyen de la surface du pixel.

Les données obtenues par VIMS et NIMS sont des spectres infrarouges qui permettent d'étudier la composition des surfaces des satellites de glace. Les constituants glacés d'intérêt pour l'étude sont les glaces d'eau et de dioxyde de carbone, leur mélange et les clathrates de dioxyde de carbone, structure particulière qui inclut une molécule de CO_2 dans une cage de glace d'eau.

I.1.3 Les glaces d'intérêt planétologique

Cette partie présente les glaces sur lesquelles l'étude s'est appuyée. La glace d'eau est le constituant qui a été le plus étudié dans ce travail. Le chapitre III lui est réservé. L'influence du dioxyde de carbone sur la signature spectrale de l'eau est également étudiée dans les cas de mélange ou de formation de clathrates (voir Chapitre IV). Cette partie se découpe en trois paragraphes qui décrivent successivement la glace d'eau, de CO_2 et leur mélange (linéaire ou sous forme de clathrates). Chaque paragraphe présente les différentes structures des constituants et leur spectre infrarouge. Le dernier paragraphe s'attache à décrire leur place dans la planétologie.

La glace d'eau

La glace d'eau apparaît dans la nature sous forme de neige, de grêle, de glaçon, de glacier, de banquise ou encore de calotte polaire glacée. C'est un composant essentiel de notre climat et il joue un rôle important dans le cycle de l'eau qui permet la vie sur Terre. Cette section se découpe en deux parties. D'une part, quelques généralités permettront de bien connaître cette glace, au coeur de l'étude. D'autre part, sa signature spectrale sera présentée pour ses formes glacée et liquide.

Généralités. La glace d'eau possède quinze phases cristallines connues. Dans un contexte courant, le terme « glace d'eau » représente la glace de type Ih qui est la phase de glace la plus commune à la surface de la Terre. La glace d'eau, comme les minéraux, possède un réseau cristallin ordonné. Sa structure cristalline régulière se compose de molécules d'eau, constituées d'un atome d'oxygène lié à deux atomes d'hydrogène par des liaisons covalentes. Cependant, beaucoup de propriétés physiques de l'eau et de la glace sont contrôlées par la formation de liaisons hydrogène entre l'oxygène et l'hydrogène de deux molécules voisines. Cette liaison est faible mais elle contrôle fortement les structures de l'eau et de la glace. Contrairement à la plupart des matériaux solides, la glace d'eau, à pression atmosphérique, est moins dense que l'eau liquide. La densité de la glace est de 0,9167 g.cm^{-3} à 0° alors que l'eau à une densité de 0,9998 g.cm^{-3} à la même température. En refroidissant, l'eau liquide forme des cristaux hexagonaux, et allège ainsi sa densité. La glace voit sa densité augmenter légèrement quand la température décroît et atteint une valeur de 0,9340 g.cm^{-3} à -180° (Lide, 2005). Une propriété physique peu commune de ce matériau est que la glace se liquéfie quand la pression augmente à température constante (jusqu'à 200 MPa, en fait, pour la glace Ih uniquement). La glace, l'eau et la vapeur d'eau coexistent au point triple qui est à 273,16 K et

611,73 Pa. Le point critique de l'eau est à 647 K et 22,064 MPa. Les glaces formées à haute pression possèdent des structures cristallines différentes. La figure I.3 présente le diagramme des phases de l'eau avec les 15 phases de glaces différentes connues. Ces types de glace se différencient par leur structure cristalline, leur ordre et leur densité. Les phases IV et XII (découvertes en 1996) sont métastables sous pression et complètement désordonnées. Les phases XIII et XIV ont été découvertes par Salzmann et al. (2006b). Les phases XI, XIII et XIV sont des formes ordonnées des glaces Ih, V et XII, respectivement. La phase XV a été découverte à des pressions extrêmement hautes et à -143°C par Sanders (2009). L'eau solide peut également exister sous différentes formes amorphes qui se différencient par leur densité. Le tableau I.1 donne les caractéristiques de chaque phase. Les glaces amorphes et cristallines (Ic et Ih) se trouveront à la surface des planètes alors que les glaces de hautes pressions seront stables dans les intérieurs planétaires.

TABLE I.1 – Caractéristiques des différentes phases de glace

Phase	Caractéristiques
Glace amorphe	La glace amorphe est un solide sans structure cristalline, sans ordre. La glace amorphe existe sous trois formes : faible densité (formée à pression atmosphérique ou en dessous), haute densité et très haute densité (formées à des pressions plus importantes). Le premier type se forme par refroidissement rapide, voire instantané, de l'eau liquide, ou par déposition de vapeur d'eau sur des substrats très froids ou encore, par chauffage des formes de glace haute densité à pression ambiante.

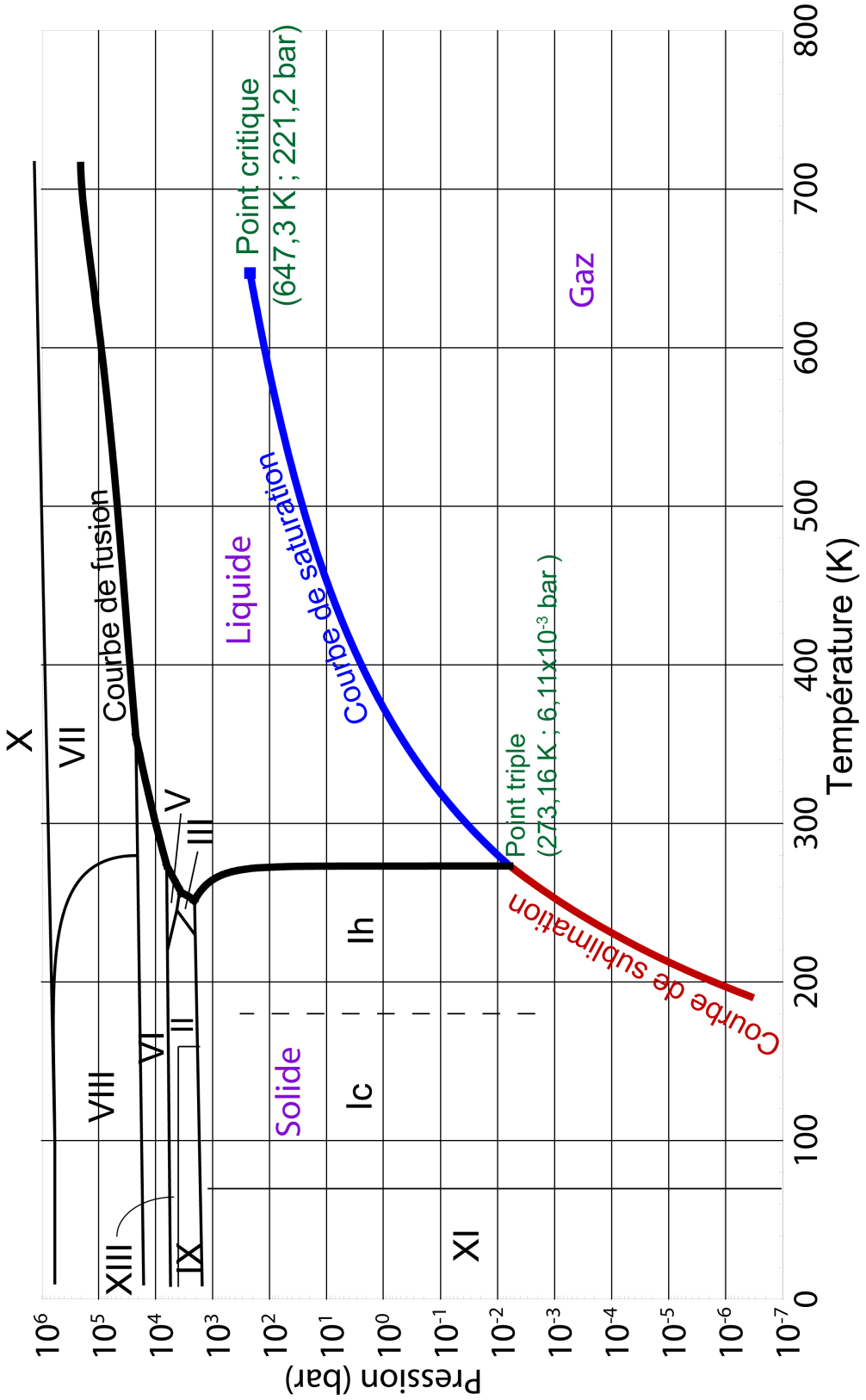


FIGURE I.3 – Diagramme de phase de l'eau et de la glace d'eau, d'après ChemicaLogic, 1998.

Phase	Caractéristiques
La glace Ih	La glace cristalline hexagonale est la glace ordinaire trouvée à la surface de la Terre.
La glace Ic	La glace cristalline cubique est métastable. Les atomes d'oxygène s'arrangent selon la structure du diamant. Elle est produite à des températures comprises entre 130 et 220 K mais peut exister jusqu'à 240 K, (Murray et Bertram, 2006; Murray, 2008), avant de se transformer en glace Ih.
La glace II	De structure cristalline fortement ordonnée et rhomboédrique, cette glace se forme par compression de la glace Ih à des températures entre 190 et 210 K. Le chauffage de cette phase mène à la glace III.
La glace III	De structure cristalline tétragonale, cette glace se forme par refroidissement de l'eau à 250 K à 300 MPa. Elle possède la densité la plus faible des glaces de haute pression mais elle reste plus dense que l'eau.
La glace IV	Phase rhomboédrique métastable, elle est formée par chauffage lent de la glace amorphe de haute densité à 810 MPa. Elle se forme difficilement sans agent nucléant (Salzmann et al., 2003).
La glace V	De structure cristalline monoclinique, cette phase est formée par refroidissement de l'eau à 253 K à 500 MPa. Cette structure est la plus compliquée de toutes (Kamb et al., 1967).

Phase	Caractéristiques
La glace VI	De structure cristalline tétragonale, cette glace se forme par refroidissement de l'eau à 270 K à 1,1 GPa (Kuhs et al., 1984).
La glace VII	Phase cubique désordonnée dont les liaisons hydrogènes forment deux réseaux entrelacés, cette glace se forme par compression de l'eau au delà de 3 GPa (Kamb et Davis, 1964).
La glace VIII	Version plus ordonnée de la phase VII dans laquelle les atomes d'hydrogène tiennent une position fixe, cette glace est formée par refroidissement de la glace VII sous 278 K. Sa densité est de 1,66 g.cm^{-3} (Eisenberg et Kauzmann, 1969).
La glace IX	De phase tétragonale, ce type de glace est formé progressivement par refroidissement de la glace III de 208 K à 165 K (Londono et al., 1993). Elle est stable sous 140 K à des pressions entre 200 et 400 MPa. Sa densité est de 1,16 g.cm^{-3}, légèrement plus haute que la glace ordinaire.
La glace X	Cette glace, symétrique, dont les protons sont ordonnés, (Hirsch et Holzapfel, 1984), se forme au delà de 70 GPa (Hemley et al., 1987).
La glace XI	Cette forme basse température de la glace hexagonale a une structure orthorhombique. Ferroélectrique, elle est considérée comme la configuration la plus stable de la glace Ih (Fan et al., 2010). Les processus de transformations naturelles sont très lents, cette structure a été trouvée dans la glace Antarctique veille de 10 à 100 000 ans (Fukazawa et al., 1998). La glace XI se forme donc à une température inférieure à 240 K (Fukazawa et al., 1998).

Phase	Caractéristiques
La glace XII	Phase cristalline dense et métastable de structure tétragonale, cette glace est observée dans l'espace des phases entre la glace V et VI. Elle est formée par chauffage de la glace amorphe de haute densité de 77 K à 183 K à 810 MPa (Salzmann et al., 2003).
La glace XIII	Cette phase cristalline monoclinique est formée par refroidissement de l'eau en dessous de 130 K à 500 MPa (Salzmann et al., 2006b). Cette glace est une forme ordonnée de la glace V.
La glace XIV	Phase cristalline orthorhombique, cette glace se forme à une température inférieure à 118 K et à des pressions supérieures à 1,2 GPa (Salzmann et al., 2006b), et elle est considérée comme une forme ordonnée de glace XII (Salzmann et al., 2006a).
La glace XV	Forme ordonnée de la glace VI, elle s'obtient en refroidissant de l'eau entre environ 80 à 108 K à 1,1 GPa (Salzmann et al., 2009).

Dans l'étude expérimentale menée au laboratoire sur la glace d'eau cristalline Ih, la présence de glace amorphe et de glace cristalline Ic a également été détectée.

Spectroscopie IR de l'eau. Ce travail s'est focalisé sur l'étude de la dépendance en température et en taille de grains de la signature spectrale de la glace d'eau cristalline à basse pression. Dans ce cadre, des expériences par paliers de température à différentes tailles de grains ont été effectuées. La figure I.4 est un spectre de glace d'eau réalisé en laboratoire à 80 K, sous vide primaire (autour de 10^{-5} bar), sur des grains dont la taille est d'environ 211 μm. Dans notre étude, trois bandes d'absorption nous ont particulièrement intéressés, les bandes à 1,05, 1,30 et 1,50 μm (respectivement, 9523, 7692 et

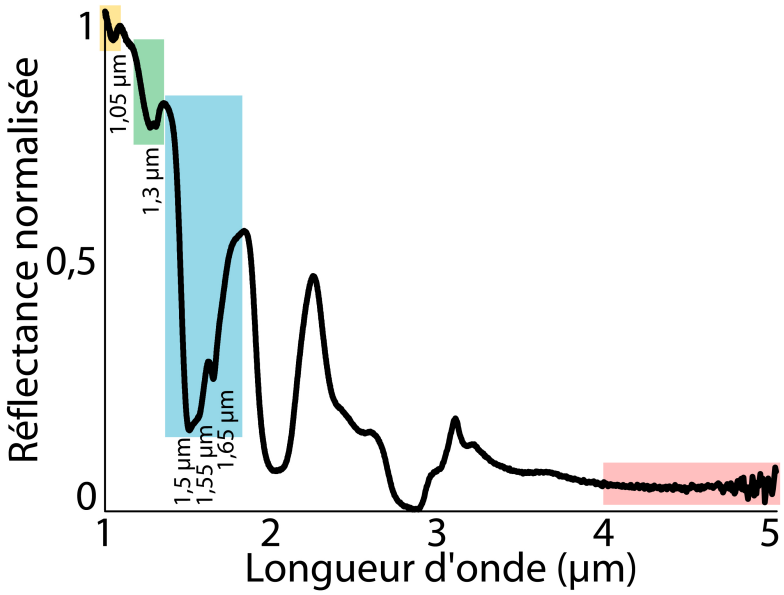


FIGURE I.4 – Spectre expérimental de glace d'eau pure à 80 K pour une taille de grains de 211 μm. Les cadres de couleur mettent en évidence les zones étudiées. Le cadre rouge montre une partie du spectre qui est fortement bruitée en raison des limites instrumentales.

6666 cm^{-1}) dont la dernière est large et constituée de trois bandes à 1,50, 1,55 et 1,65 μm (respectivement, 6666, 6451 et 6060 cm^{-1}). Toutes ces positions sont données de manière approximative puisqu'elles dépendent de la température et de la taille de grain. La figure I.4 présente un cadre rouge entre 4 et 5 μm, ce domaine spectral paraît bruité à cause des limites du détecteur.

De manière à pouvoir s'assurer de la présence de glace d'eau, une brève étude a été réalisée sur de l'eau liquide. La signature spectrale de l'eau liquide a été obtenue expérimentalement dans une cellule à pression fluide qui permet très facilement le remplissage avec l'eau liquide. La figure I.5 présente un spectre d'eau liquide à température et pression ambiantes. La signature spectrale d'eau liquide présente des bandes d'absorption à 1,5 μm et à 2 μm comme la glace d'eau. En revanche, elle est caractérisée par un

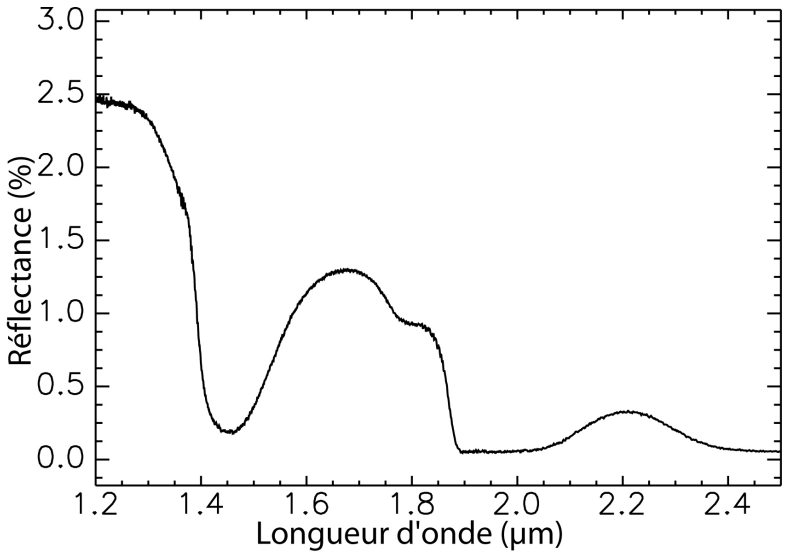


FIGURE I.5 – Spectre d'eau liquide en réflectance à température et pression ambiantes entre 1,2 et 2,5 μm. Acquisition sous le microscope infrarouge du spectromètre à transformée de Fourier le 9 avril 2008.

point d'inflexion à 1,78 μm. Ce point d'inflexion, découvert par Ellis (1931) et la bande d'absorption à 1,65 μm de la glace d'eau cristalline permettent de faire facilement la distinction entre la signature de l'eau liquide et celle de la glace d'eau qui ne présente pas de point d'inflexion mais une bande à 1,65 μm, si la glace est assez froide.

Le spectre infrarouge de l'eau est caractérisé par une large et forte bande d'absorption entre 2,8 et 3,5 μm, associée à deux modes de vibration fondamentaux d'étirement symétrique ($\nu 1$ = 3,1 μm, (Hunt et Salisbury, 1970)) et asymétrique ($\nu 3$ = 2,903 μm, pour l'eau liquide et 2,941 μm pour la glace, (Hunt et Salisbury, 1970)) de la liaison O-H (Schriver-Mazzuoli et al., 2000). L'ensemble des bandes est décalé vers les hautes longueurs d'onde quand la température diminue. Les valeurs des modes propres varient donc également. Les bandes présentes sur le spectre à plus courtes longueurs d'onde représentent des modes harmoniques (multiples d'un mode fondamental) ou des modes

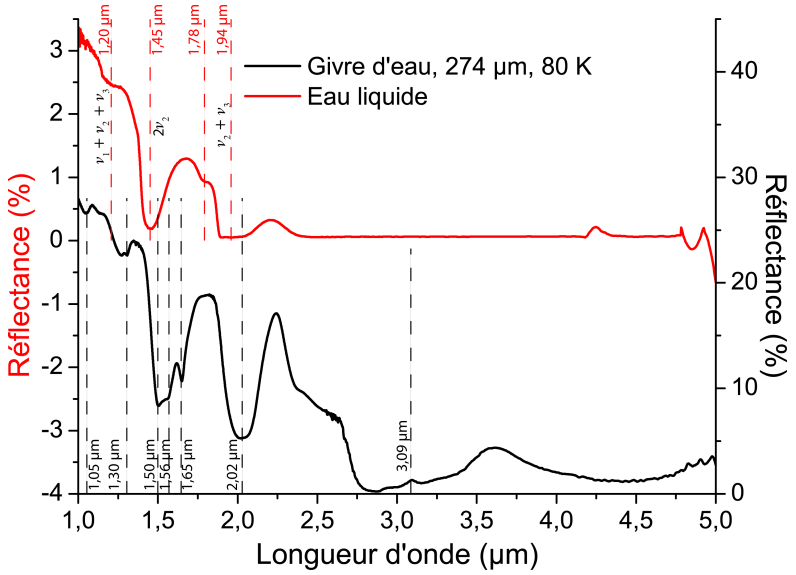


FIGURE I.6 – Comparaison des spectres d'eau liquide et solide. Les positions des bandes principales est décalée. Certaines bandes ne sont présentes que dans le spectre de glace (1,05, 1,30 et 1,65 μm et le pic de fresnel à 3,09 μm) et d'autres que dans le spectre d'eau liquide (1,78 μm).

de combinaisons (combinaison linéaire de plusieurs modes fondamentaux). Les différents modes se retrouvent dans les deux phases mais à des longueurs d'onde différentes. La figure I.6 montre le décalage des bandes d'absorption des spectres d'eau liquide et solide qui est nettement visible. L'eau liquide possède des absorptions à 1,20, 1,45, 1,78 et 1,94 μm alors que la glace d'eau présente des caractéristiques spectrales autour de 1,05, 1,30, 1,50, 1,56, 1,65, 2,02 et 3,09 μm. La dernière caractéristique est un pic de réflectance, nommé le pic de Fresnel, et est considérée comme une signature typique de la glace cristalline.

Le dioxyde de carbone

A basse pression, le dioxyde de carbone ne peut être présent que sous forme de gaz ou de givre, selon la température. Sur les satellites de glace, le gaz peut être détecté par spectroscopie infrarouge dans l'atmosphère, plus ou moins ténue, ou à leur surface, éventuellement piégé dans une matrice de glace ; son état physique peut alors être discuté : dans la matrice hôte, le dioxyde de carbone peut être soit sous forme de gaz, soit sous forme de glace. Cette section présente des généralités sur le dioxyde de carbone et les signatures spectrales du gaz et du solide.

Généralités. Le dioxyde de carbone sous forme solide a de nombreuses appellations : « glace carbonique », « neige carbonique », « carboglace », « glace sèche ». Fabriquée à partir de dioxyde de carbone liquide que l'on détend brusquement à la pression atmosphérique, la neige carbonique est ensuite pressée pour former de la glace sèche. D'après Datchi et al. (2009), sept phases de glace de dioxyde de carbone existent. Dans les gammes de pressions et de températures auxquelles l'étude est effectuée, seules les phases solide I et gazeuse du dioxyde de carbone sont présentes. Un diagramme de phase est présenté sur la figure I.7 de manière à repérer le domaine de stabilité de la glace I de CO_2.

Spectroscopie IR du CO_2. Le dioxyde de carbone peut être détecté sur d'autres planètes, grâce à la spectroscopie infrarouge, par sa bande d'absorption à 4,25 μm, lorsqu'il est en petite quantité. Cette bande varie en position selon l'état physique du matériau. Cependant, d'autres bandes sont caractéristiques du CO_2. Deux signatures spectrales du dioxyde de carbone sont présentées ici, celle du solide (figure I.8) et celle du gaz (figure I.9). Le dioxyde de carbone possède trois modes de vibration fondamentaux, seul le

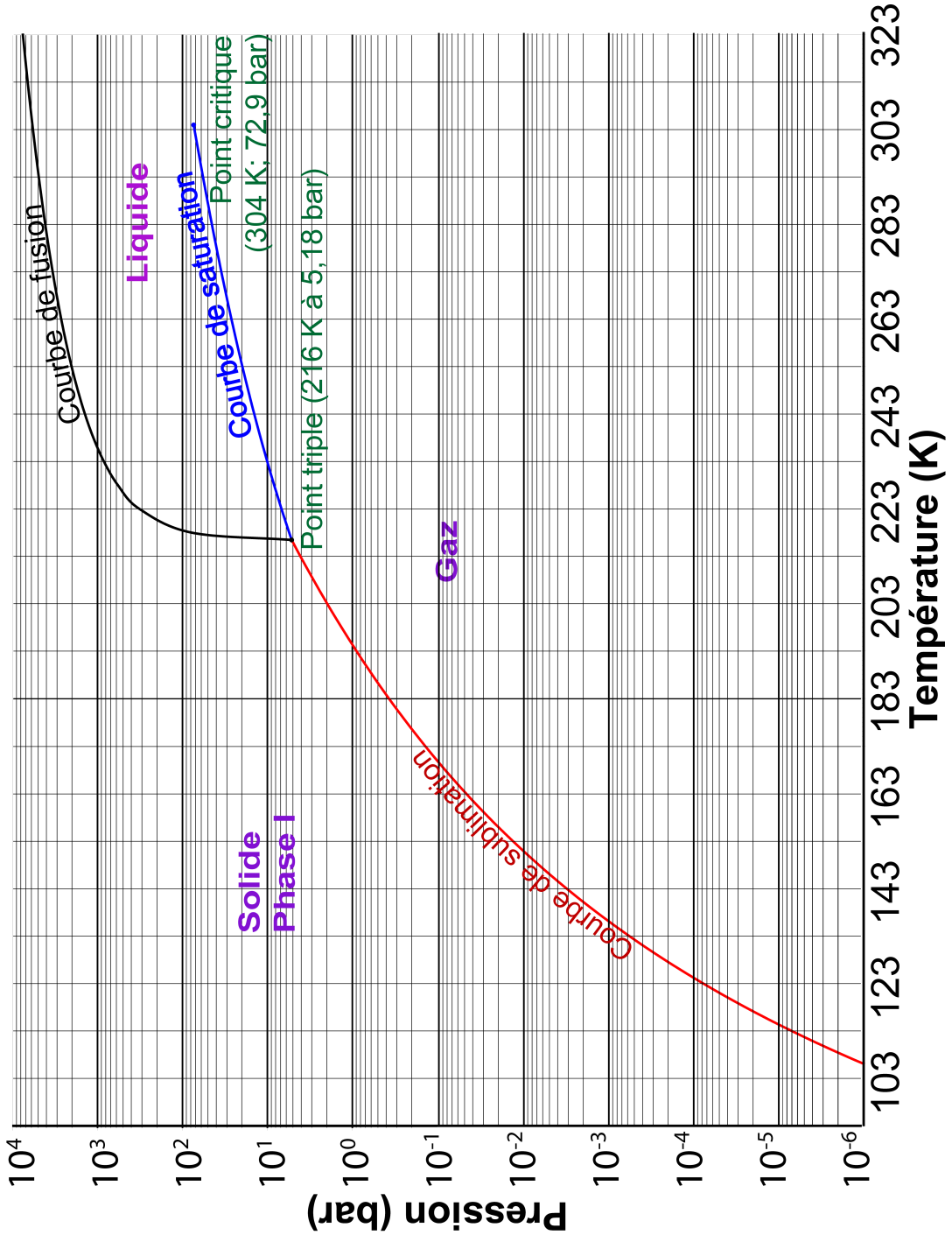


FIGURE I.7 – Diagramme de phase du dioxyde de carbone, d'après ChemicaLogic, 1999.

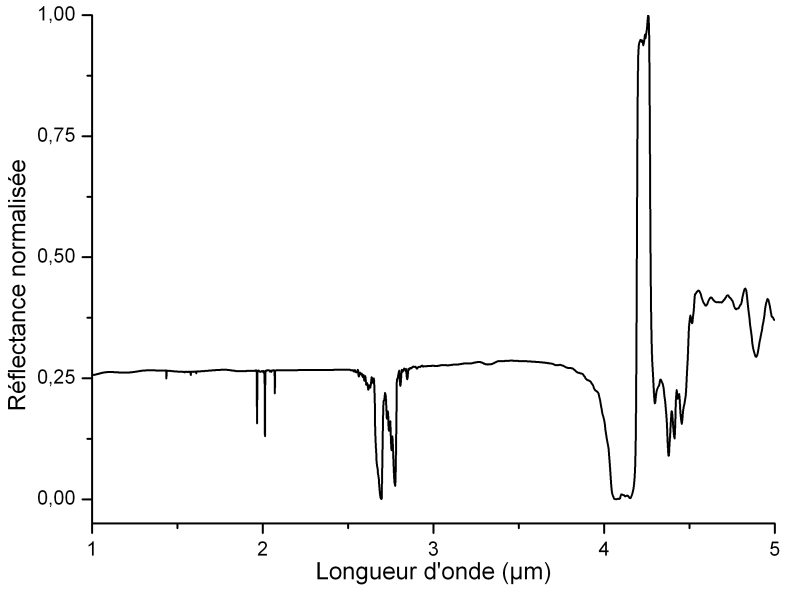


FIGURE I.8 – Spectre de dioxyde de carbone solide d'un grain de 230 μm à 78,9 K.

mode d'étirement asymétrique (ν_3) est visible sur la gamme de longueurs d'onde d'intérêt pour l'étude. Ce mode de vibration est à la longueur d'onde qui permet d'identifier la présence du dioxyde de carbone à la surface des planètes. Cependant, les caractéristiques principales du spectre infrarouge de la glace de CO_2 sont le triplet autour de 2 μm et le doublet autour de 2,7 μm qui correspondent aux fréquences de vibration moléculaire du gaz de CO_2 (Kieffer, 1970). De plus, des absorptions, autour de 1,4 μm, sont visibles sur le spectre de la glace et peu observables sur celui du gaz. La réflexion très intense à 4,2 μm dans le solide est provoquée par une réflexion de Fresnel. Le dioxyde de carbone solide possède également une absorption autour de 4,89 μm. La figure I.10 présente les différents modes de vibration de la glace de dioxyde de carbone.

La connaissance des spectres de dioxyde de carbone va permettre son identification à la surface des planètes ou dans leur éventuelle atmosphère.

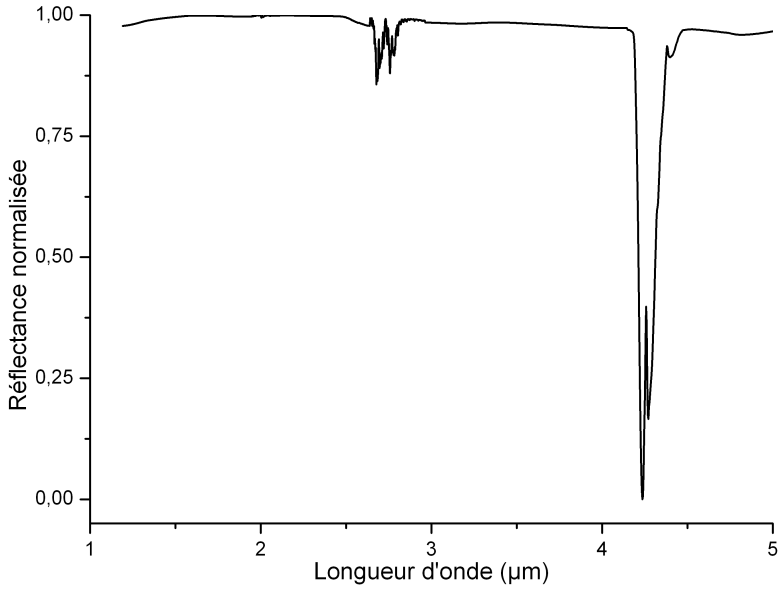


FIGURE I.9 – Spectre de dioxyde de carbone gazeux à 290 K.

Le mélange et les clathrates de dioxyde de carbone

Les glaces d'eau et de dioxyde de carbone, très répandues dans notre système solaire, sont détectées sur les planètes par spectroscopie infrarouge. Leur présence simultanée à la surface des lunes de glace provoque certainement des interactions entre ces deux constituants. Le dioxyde de carbone peut être soit mélangé à la glace d'eau, soit piégé dans une structure clathrate. Cette partie présente les définitions du mélange et de la structure clathrate.

Définition du mélange. Les matériaux purs se trouvent rarement dans la nature, souvent, les analyses des sols à distance montrent une signature spectrale représentative de plusieurs composants qui forment le mélange, *i.e.* le sol, observé. L'approche des signatures spectrales naturelles par des modèles utilise des méthodes de mélanges li-

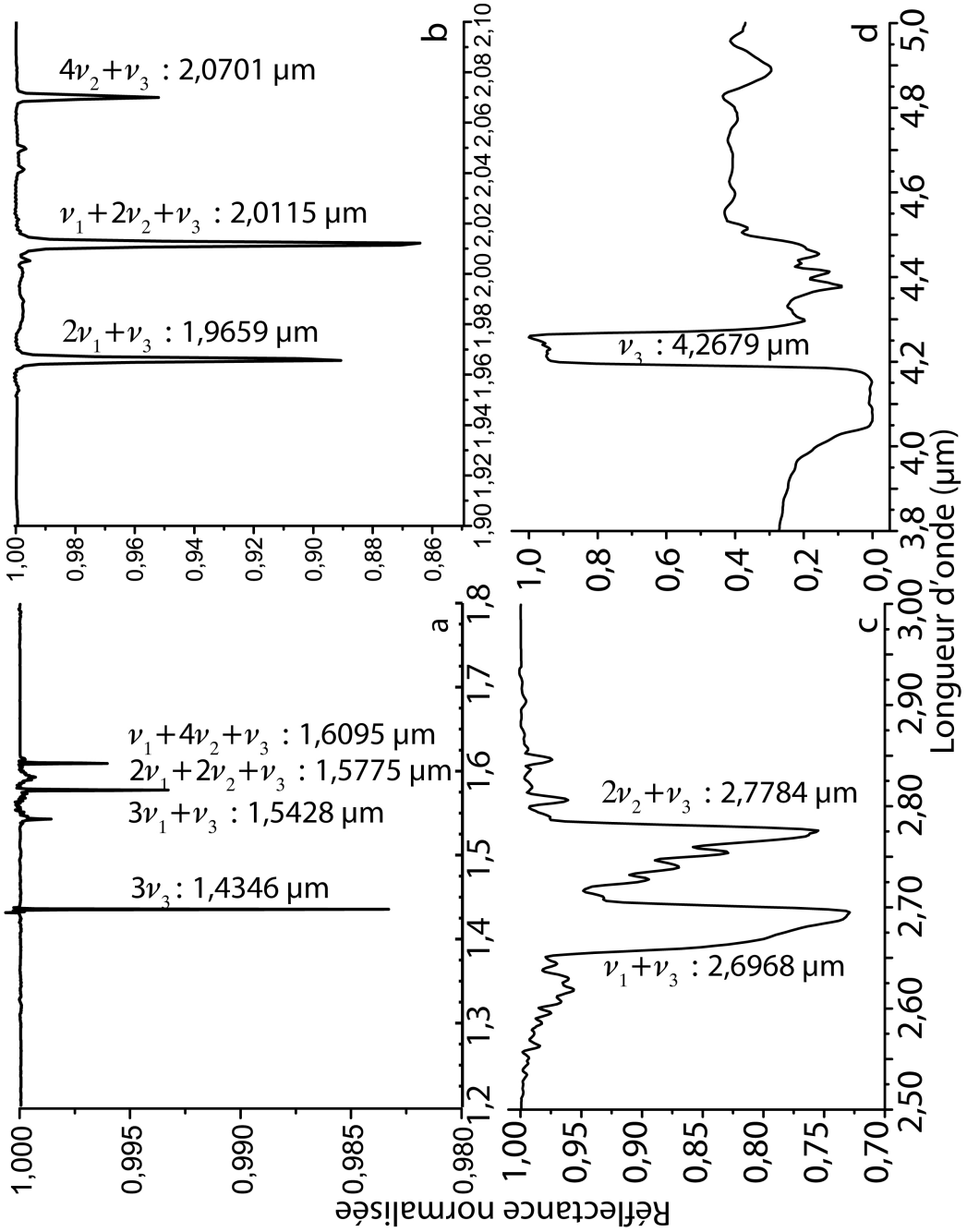


FIGURE I.10 – Agrandissement de quatre parties du spectre de dioxyde de carbone solide. a) De 1,2 à 1,8 μm. b) De 1,9 à 2,1 μm. c) De 2,5 à 3 μm. d) De 3,8 à 5 μm. Les modes de vibration sont en partie indiqués près des bandes d'absorption correspondantes (Quirico et Schmitt, 1997; Dartois et Schmitt, 2009).

néaires et non linéaires, *i.e.* des mélanges intimes ou non réels. Le modèle de mélange linéaire consiste en la décomposition d'une surface d'étude en blocs de matériaux purs. La signature spectrale résultante sera une combinaison linéaire des spectres de matériaux purs dans laquelle chaque matériau contribue de manière proportionnelle à son abondance ou sa fraction d'aire (Adams et al., 1993; Clark, 1999). En pratique, ces modèles sont très proches de la réalité même si l'hypothèse d'une surface discrète est fausse. Les modèles non linéaires, quant à eux, sont développés en utilisant des combinaisons de considérations physiques et d'approximations théoriques (Kubelka et Munk, 1931; Chandrasekhar, 1960; Nicodemus, 1965; Emslie et Aronson, 1973; Hapke, 1981, 1993; Wiscombe, 1980; Shkuratov et al., 1999; Shkuratov et Grynko, 2005). Les plus utilisées se sont appuyées sur des modèles de transfert radiatif développés par Chandrasekhar (1960) pour calculer le transfert d'énergie dans les atmosphères stellaires. Pour l'application aux surfaces planétaires, l'hypothèse que les particules ne sont pas en contact l'une de l'autre est éliminée pour considérer les effets de rayonnement de la diffusion dans le transfert radiatif (Hapke, 1993). Ces modèles peuvent ainsi déterminer les variations de composition et de taille de grains des surfaces mais requièrent un certain nombre de paramètres mesurés et hypothétiques (qui peuvent être ajustés au cours des itérations). L'utilisation de ces modèles nécessite une attention particulière sur les hypothèses et leur domaine de validité. De plus, les modèles non linéaires impliquent la mesure expérimentale de constantes optiques sur des spectres en transmittance (ou absorbance), *i.e.* la détermination des indices de réfraction réels et imaginaires des matériaux. Ces paramètres sont aussi obtenus en utilisant des approches théoriques de dispersion classique, d'analyses de Kramers-Krönig et de modèles de transfert radiatif. Chaque approche est utilisée pour différentes propriétés d'échantillon telles que la taille de grain, la rugosité, l'épaisseur, le type d'échantillon (poudre ou plaque), sa forte

ou faible absorbance ... (Arhenkiel, 1971; Warren, 1984; Hapke, 1993; Lucey, 1998; Grundy et Schmitt, 1998; Dalton, 2010).
Les modèles de mélanges linéaires et intimes ont besoin de spectres de référence obtenus en laboratoire.

Quand les deux constituants, eau et CO_2, sont en contact, la question de la formation de clathrates est possible.

Définition de la structure clathrate. Le clathrate est défini par différentes structures contituées d'un matériau hôte, l'eau, et d'un matériau piégé, de petites molécules de gaz comme le CO_2. La figure I.11 présente les trois structures de clathrate : La structure I (sI), la structure II (sII) et la structure H (sH). Chaque structure est composée de plusieurs cages (cinq types au total) qui sont elles-mêmes constituées de différentes tailles de polyèdres, et formées par des liaisons hydrogène entre les molécules d'eau. Jeffrey (1984a) établie une nomenclature pour décrire efficacement les cages qui constituent les structures. Par exemple, 5^{12} est une cage formée par 12 pentagones de longueur de côté et d'angle équivalents et $5^{12}6^4$ est formée de 12 pentagones et 4 hexagones. La figure I.12 présente les cinq types de cages qui permettent la formation des clathrates.

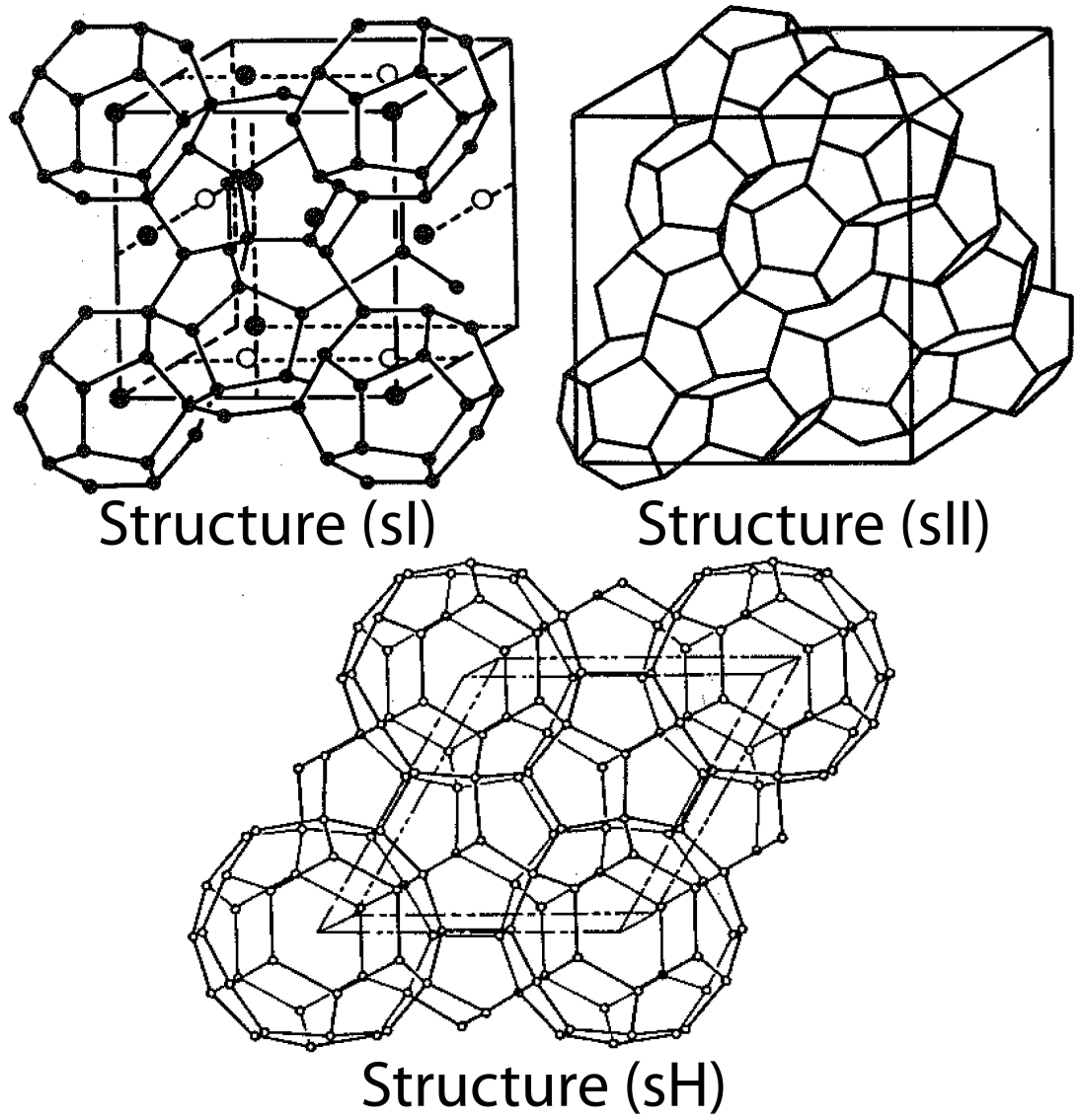


FIGURE I.11 – Représentation schématique des trois structures de clathrates sI, sII et sH.

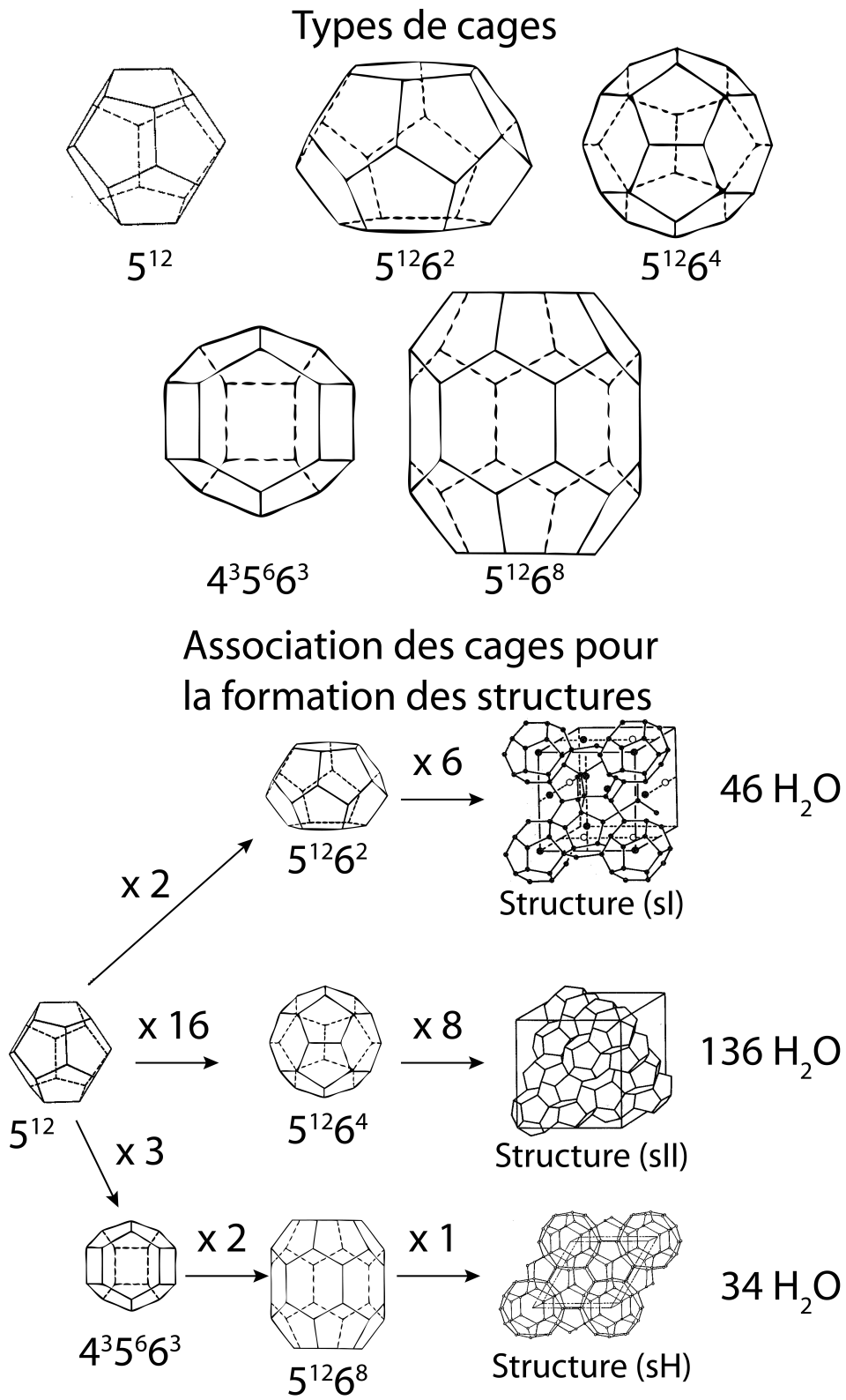


FIGURE I.12 – Représentation schématique des cinq types de cages qui forment les différentes structures de clathrates et des associations possibles pour la formation des trois structures clathrates, sI, sII et sH.

Le tableau I.2 présente différentes caractéristiques des structures de clathrates et la répartition de leurs cages.

TABLE I.2 – Caractéristiques des différentes structures de clathrates

Structure clathrate	sI		sII		sH		
Taille de la cavité	Petite	Large	Petite	Large	Petite	Moyenne	Large
Cages constitutives	5^{12}	$5^{12}6^2$	5^{12}	$5^{12}6^4$	5^{12}	$4^35^66^3$	$5^{12}6^8$
Nombre de cavité par cages	2	6	16	8	3	2	1
Système cristallographique	Cubique		Cubique		Hexagonal		
Réseau	Cubique Centré		Cubique Faces Centrées				

Seule la structure sI nous intéresse dans notre étude. En effet, la pression à la surface des planètes et celle de nos équipements de laboratoire (pour la spectroscopie infrarouge) ne permettent pas la stabilité d'autres structures. Cette structure est constituée de 46 molécules d'eau réparties sur 8 polyèdres (2 petites cages et 6 grandes cages). En effet, chacune des 6 faces du cube contient deux moitiés de grandes cages, soit 6, et chacun des 8 sommets contient un huitième de petites cages, soit 1, sans oublier la petite cage située au centre du cube, ce qui fait un total de 8 cages. Cette structure contient 5,75 moles d'eau pour une mole de dioxyde de carbone. Cette structure a été déterminée par diffraction de rayons X d'un clathrate d'oxyde d'éthylène. Les sommets du réseau cubique faces centrées sont les centres des petites cages (5^{12}) qui ne partagent pas leur face directement entre-elles mais avec les faces pentagonales des grandes cages ($5^{12}6^2$). Deux grandes cages forment le motif au centre des faces du réseau. Toutes ces cages, formées par des molécules d'eau, piègent des molécules de gaz, selon un certain taux

d'occupation. Les clathrates peuvent également être classés par la nature chimique ou la taille et la forme des molécules piégées. Jeffrey et McMullan (1967) proposent une caractérisation des molécules piégées en quatre catégories :

- Les constituants hydrophobes
- Les gaz acides solubles dans l'eau
- Les composants polaires solubles dans l'eau
- Les sels d'alkylammonium ternaire ou quaternaire solubles dans l'eau

Les deux premières catégories sont constituées de la plupart des clathrates de gaz naturels, seuls le dioxyde de carbone et les sulfides d'hydrogène font partie de la deuxième catégorie.

La nature physico-chimique des molécules piégées a été étudiée par diffraction des rayons X et des rayons à neutrons, par résonance électromagnétique nucléaire et constante diélectrique (Jeffrey, 1984b,a; Davidson, 1971; Davidson et al., 1984). La molécule piégée semblerait se placer préférentiellement sur un mur de la cage, de manière excentrée, surtout aux températures inférieures au point d'ébullition de l'azote liquide.

Les méthodes de spectroscopie ont été utilisées pour étudier les structures des clathrates, en particulier, la résonance magnétique nucléaire, la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier et la spectroscopie Raman. La RMN permet l'identification des structures, la détermination de l'occupation relative des cages, l'orientation de l'eau et la diffusion. La spectroscopie infrarouge montre les similitudes entre les signatures de clathrates et de glace. Cette méthode n'a pas été encore largement utilisée pour l'étude des clathrates, ce qui explique une partie du travail effectué dans cette thèse. Cependant, Smythe (1975) publie un spectre de clathrates de CO_2. Enfin, la spectroscopie Raman mesure le nombre d'hydratation et permet de déterminer le taux d'occupation des cages.

La stabilité des clathrates de CO_2 a été étudiée expérimentalement. La figure I.13

est un diagramme de phase qui expose les domaines de stabilité des glaces d'eau, de dioxyde de carbone et des clathrates de CO_2.

Lien avec la planétologie

L'identification des constituants d'une surface planétaire est réalisée par spectroscopie infrarouge. Les observations spectrales passées, présentes et futures des missions spatiales requièrent des spectres de référence réalisés en laboratoire pour estimer les abondances quantitatives des constituants détectés. En effet, chaque matériau possède une signature propre qui permet de le reconnaître. Ainsi la composition d'une surface inconnue peut être déterminée par comparaison avec des spectres de référence qui sont effectués en laboratoire, sur des matériaux purs dont l'environnement de température et de pression est connu. Une correspondance parfaite signifie que la composition, la structure et les conditions physiques ont été exactement reproduites. Cependant, certains constituants ont des signatures proches, l'interprétation spectrale doit donc toujours rester ouverte à la discussion.

L'acquisition des spectres de glace pour l'étude des corps glacés du système solaire doit respecter certaines conditions pour être comparable aux spectres naturels (Dalton, 2010). Un système de purge peut être installé au dessus de l'échantillon pour prévenir de la contamination atmosphérique. Lors d'expérimentation sur des échantillons glacés, la vapeur d'eau atmosphérique, le dioxyde de carbone ou d'autres espèces volatiles pourraient se condenser sur les matériaux étudiés, faussant ainsi leur signature spectrale. D'autres considérations matérielles sont à prendre en compte, comme la géométrie d'observation, l'influence de la diffusion ou de la réflexion de la lumière et la présence de sources de lumière extérieures. De même, les fenêtres des cellules d'analyse doivent être transparentes aux longueurs d'onde de l'étude. Enfin, la surface de

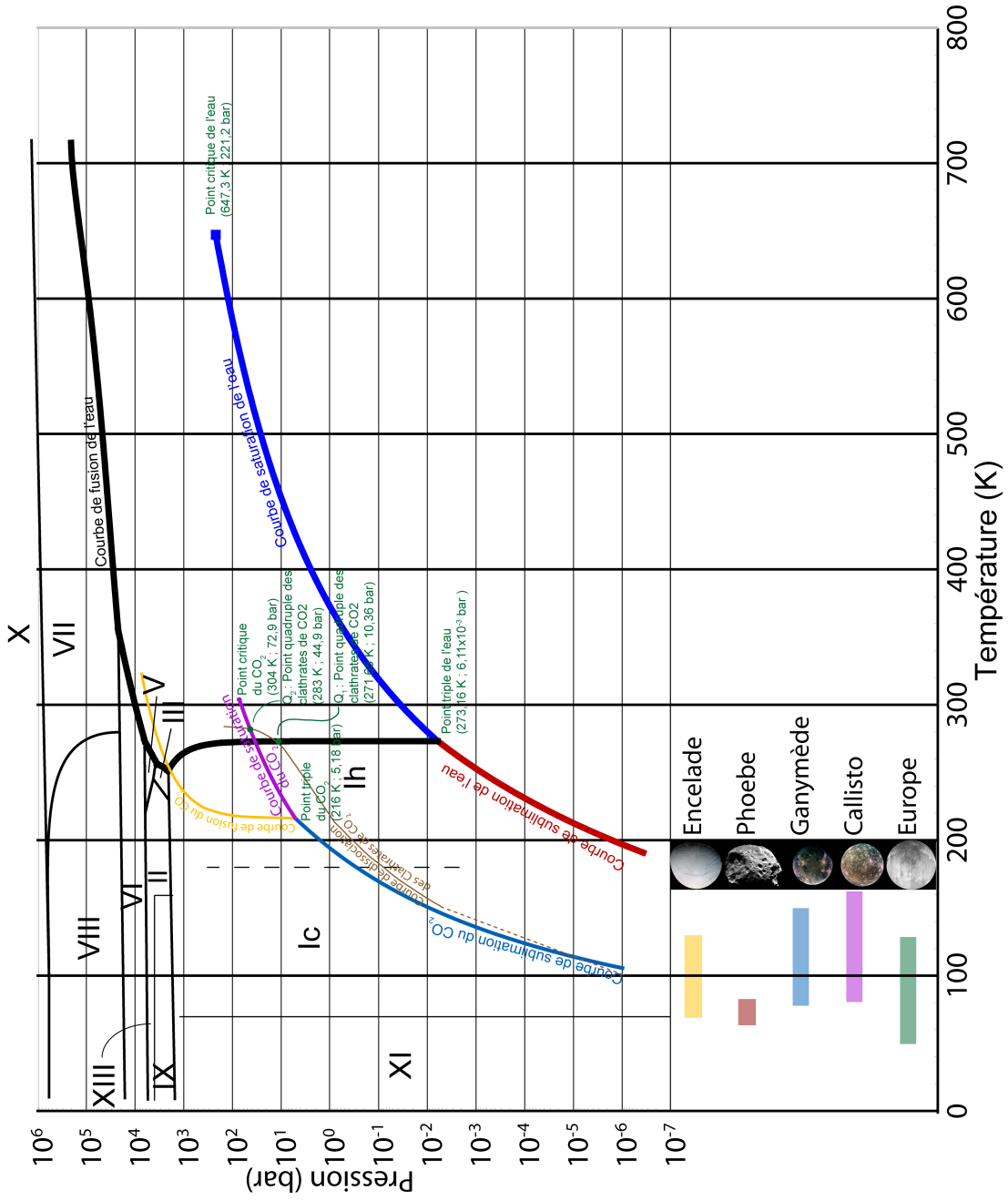


FIGURE I.13 – Diagramme de phase de la glace d'eau, de la glace de CO_2 et des clathrates de CO_2. Indication des températures de surface de différents satellites de glace.

référence utilisée pour l'acquisition du background doit avoir une rugosité similaire à celle de l'échantillon étudié de manière à renvoyer la lumière sans saturer le détecteur. En ce qui concerne les configurations spectrales, le domaine spectral optimal d'étude pour comparer les spectres de laboratoire à ceux des objets naturels, est compris entre 0,3 et 5,5 μm. Le domaine de température idéal pour étudier l'ensemble des corps glacés du système solaire est compris entre 30 et 300 K. Malheureusement, notre dispositif expérimental ne nous permet pas d'atteindre des températures inférieures à 80 K, température d'ébullition de l'azote liquide. Cependant, les températures des satellites de glace d'intérêt pour l'étude sont comprises dans notre gamme (Dalton, 2010). Les études d'échantillons glacés en température, *i.e.* par acquisition d'un spectre tous les 10 K, sont courantes en laboratoire. Cependant, les changements qui s'opèrent dans les échantillons glacés sous vide sont lents et nécessitent un temps de relaxation plus important que le temps de l'expérience (Dalton, 2010). Les constantes optiques, en plus de permettre la modélisation de spectres théoriques, peuvent également enrichir les modèles de mélanges linéaires et améliorer l'estimation des propriétés de surface, telle que la porosité par exemple (Dalton, 2010). De plus, les épaisseurs des échantillons de laboratoire doivent être suffisantes pour être comparables à des surfaces analysées à distance. La taille de grains des échantillons, si possible, doit être controlée sur différents domaines : 1 - 25 μm, 25 - 100 μm et 100 - 250 μm fourniraient des données suffisantes pour évaluer les effets relatifs sur la signature spectrale de la taille de grains, du volume et de la diffusion interne (Arhenkiel, 1971; Salisbury et al., 1991; Lucey, 1998; Dalton, 2010). Par ailleurs, différents composants sont à explorer pour fournir les bases de données de spectres utiles à l'étude des satellites joviens et saturniens. Pour les satellites galiléens, les composants majeurs à analyser sont les matériaux hydratés (sels et acides), les dérivés du soufre et des silicates, les produits issus de la photolyse ou de

la radiolyse, et les glaces volatiles pures. Les composants étudiés dans ce travail sont des glaces d'eau et de CO_2, pures et mélangées, ainsi que les clathrates de CO_2 dont la présence est suspectée sur Europe (Prieto-Ballesteros et al., 2005). Les hydrocarbures (chaîne aliphatique ou cyclique) et les volatils organiques ont une importance particulière pour les satellites saturniens, et plus spécialement Titan.

Les différentes phases de glace détectables sur les objets du système solaire dépendent des conditions de pression et de température lors de leur formation et de la quantité de radiation reçue au cours de leur histoire. Les phases solides couramment rencontrées dans l'espace, sont les glaces amorphe, hexagonale et cubique (Cruikshank, 1998; Jenniskens et al., 1998; Schmitt et al., 1998). La glace amorphe se transforme en glace cristalline cubique vers 135 K (Sugisaki et al., 1969; Jenniskens et Blake, 1994; Kouchi et al., 1994). La phase cubique de la glace I est métastable et se trouve en laboratoire à des températures comprises entre 135 et 170 K (Sugisaki et al., 1969; Jenniskens et al., 1997; Petrenko et Whitworth, 1999). Au delà de 170 K, la glace est hexagonale. En considérant uniquement des processus thermiques, la présence de glace amorphe à la surface des corps glacés devrait indiquer que leur température est inférieure à 100 K (Mastrapa et al., 2008). La cristallisation est une transformation irréversible, un solide amorphe qui cristalliserait lors d'un éventuel réchauffement devrait alors rester dans cet état même si la température diminuait à nouveau sous 135 K (Mastrapa et al., 2008). Cependant, plusieurs études ont montré que la glace cristalline se transformait en solide amorphe par exposition à des rayonnements ioniques ou ultraviolet (Kouchi et Kuroda, 1990; Strazzulla et al., 1991; Moore et Hudson, 1992; Strazzulla et al., 1992; Leto et Baratta, 2003; Leto et al., 2005; Mastrapa et Brown, 2006). En laboratoire, l'amorphisation par de tels processus ne peut avoir lieu qu'à des températures inférieures à 100 K,

cependant, de la glace amorphe est détectée sur des satellites galiléens comme Europe, (Hansen et McCord, 2004), dont la température en surface est comprise entre 100 et 150K (Spencer et al., 1999). Les glaces d'eau des objets du système solaire sont caractérisées par leur absorption dans l'infrarouge (Clark, 1981b). Les glaces hexagonale et cubique ont des signatures spectrales très proches (Bertie et Whalley, 1967). Une différence pourrait éventuellement apparaître entre les deux phases en comparant les profondeurs et les positions des bandes (Mastrapa et al., 2008). Par ailleurs, les signatures des glaces cristallines et amorphes se distinguent aisément (Ockman, 1958; Bertie et Whalley, 1964; Whalley, 1977; Hagen et al., 1981; Hagen et Tielens, 1982; Smith et al., 1994). Les absorptions infrarouges de la glace cristalline sont fortes, pointues et décalées vers les hautes longueurs d'onde, (Schmitt et al., 1998), contrairement à celles du solide amorphe pour lequel aucune bande n'est caractéristique, *i.e.* elles existent toutes dans le spectre de la glace cristalline (Mastrapa et al., 2008). La signature spectrale infrarouge de la glace cristalline possède également un pic de réflectance, dit « de Fresnel », à 3,1 μm. Le spectre de la glace d'eau dépend de la température (Fink et Larson, 1975). Ses bandes d'absorption se décalent vers les basses longueurs d'onde et leur amplitude diminue quand la température augmente (Bertie et Whalley, 1967; Hagen et Tielens, 1982; Smith et al., 1994; Grundy et Schmitt, 1998; Mastrapa et Brown, 2006). Enfin, la forme des bandes d'absorption de la glace amorphe est également dépendante de la température (Mastrapa et al., 2008), plus particulièrement, la bande à 1,25 μm de l'amorphe se distingue de celle de la glace cristalline par sa position et sa forme (Mastrapa et al., 2008). La signature spectrale de l'eau dépend également de la taille de grain. Cette caractéristique a été présentée par Kieffer (1970). Par la suite, Clark (1981a), Clark et al. (1983) et Clark et Lucey (1984) ont étudié la dépendance en taille de grains de glace mais n'ont pas quantifié ce phénomène par une loi. En revanche, Nolin et Dozier (1993)

ont réalisé un modèle de dépendance en taille de grains de la glace Ih et Painter et al. (1998) a utilisé des images hyperspectrales pour étudier la répartition de la taille de grains de la neige. Leur travail a abouti à l'établissement d'une loi de dépendance en taille de grains appuyée sur des observations hyperspectrales. En particulier, leur étude s'est concentrée sur la dépendance en taille de grains de la bande d'absorption à 1,05 μm. D'autres modèles ont été élaborés, (Hansen et McCord, 2004), et appliqués aux satellites de glace, plus particulièrement Encelade (Jaumann et al., 2008). Aucune étude expérimentale n'a pris en compte, en même temps, les effets de température et de taille de grains sur la signature spectrale de la glace d'eau cristalline.

La glace d'eau, très répandue dans notre système solaire, est détectée sur les planètes par spectroscopie infrarouge. Les signatures spectrales des objets naturels montrent la présence d'autres composants dont il est nécessaire de connaître les spectres pour les reconnaître. Leur identification permet d'établir des modèles géologiques et géophysiques d'évolution des satellites. Les constituants étudiés dans ce travail sont la glace d'eau, précédemment présentée, et la glace de dioxyde de carbone, exposée ci-après.

Le dioxyde de carbone est un composant significatif de l'atmosphère et des régions proches des surfaces des planètes telluriques et existe en plus petite quantité dans l'atmosphère et sur la surface de quelques corps glacés du système solaire externe (Hansen, 1997). Au début des années 70, Larson et Fink (1972), Herr et Pimentel (1969) et Pimentel et al. (1974) ont détecté la présence spectrale de la glace de CO_2 sur la calotte polaire de Mars ; sa présence saisonnière y était suspectée car il condense entre 140 et 150 K à la pression atmosphérique martienne. Par la suite, quelques pourcents de glace de CO_2 ont été identifiés sur des comètes, (Delsemme, 1988), sur Triton, satellite de Neptune, (Cruikshank et al., 1993) et dans des nuages martiens (James et al., 1992; Bell

et al., 1996). Avec les missions Galileo et Cassini, les satellites de glace ont été étudiés de plus près. De la glace de CO_2 a également été identifiée à leur surface (Carlson et al., 1996; McCord et al., 1998a; Hibbitts et al., 2000, 2002, 2003; Clark et al., 2005b,a; Filacchione et al., 2007). La principale discussion qui tourne autour du dioxyde de carbone est son état physique : gaz ou solide qui peut renseigner sur son origine endogène ou exogène. Cette ambiguïté vient de la position de la bande d'absorption à 4,25 μm. En effet, le spectre de CO_2 solide réalisé en laboratoire montre une absorption à 4,2675 μm, (Chaban et al., 2007), alors que sur les satellites joviens (Callisto et Ganymède), elle est à $\sim$ 4,2575 μm, (Hibbitts et al., 2002) et pour les satellites saturniens (Phoebe et Japet), à 4,26 μm (Clark et al., 2005b,a; Buratti et al., 2005). Ces décalages de position suggèrent que le dioxyde de carbone n'est pas condensé à la surface, sous forme de blocs de glace mais plutôt mélangé avec, voire piégé dans, une matrice de glace ou d'autres constituants. Ses liaisons avec la matrice, ou sa séquestration dans celle-ci, lui permettrait de rester à la surface des satellites (joviens) dont la température est supérieure à 100 K pour une faible pression. Dans ces conditions, le dioxyde de carbone aurait préférentiellement tendance à se sublimer (James et al., 1992). Le dioxyde de carbone peut alors être soit un solide mélangé avec la matrice, soit du gaz piégé dans des inclusions ou sous forme de clathrates.

Sur Callisto et sur Ganymède, les modèles montrent que le CO_2 ne peut pas être piégé dans la glace d'eau dont les grains sont gros, mais plutôt contenu dans les matériaux non glacés (Hibbitts et al., 2002, 2003). Ces matériaux pourraient être constitués d'hydroxydes, d'argiles et de matériaux chondritiques carbonatés (Clark et al., 1986; Calvin et Clark, 1991; Hibbitts et al., 2002), ou de composants organiques (Bell et al., 1985; Wilson et Sagan, 1995; Clark et al., 2005a,b). Le dioxyde de carbone peut être retenu à la matrice grâce à de faibles adsorptions, aux forces de van der Waals, ou par chimi-

sorption (Hibbitts et Szanyi, 2007). La chimisorption est un phénomène qui se produit quand le dioxyde de carbone donne un électron à un matériau de la surface, créant ainsi une liaison très stable. Le groupement -OH de la glace ou des argiles est un élément privilégié dans la chimisorption qui est par conséquent limitée, voire inexistante, dans les milieux anhydres (Zent et Roush, 1992). La chimisorption n'est donc pas le phénomène de piégeage du CO_2 privilégié sur les satellites de glace (Hibbitts et Szanyi, 2007). En revanche, la physisorption qui résulte de la formation de liaisons de van der Waals entre l'adsorbat et le matériau hôte, peut exister entre le dioxyde de carbone et un adsorbant. Les études expérimentales de physisorption du CO_2 à basse pression montrent que seule la bande issue de l'étirement asymétrique n'est visible sur le spectre infrarouge (Hibbitts et Szanyi, 2007) ; en effet, le mécanisme de capture affecte les caractéristiques des bandes d'absorption du dioxyde de carbone. Lors de l'adsorption, le dioxyde de carbone n'a plus la possibilité de tourner, ce qui provoque un décalage de la position de la bande ν_3 (Hibbitts et Szanyi, 2007). Le dioxyde de carbone peut être capté par des minéraux comme des basaltes, de la cordiérite, du béryl et de l'apatite sur Terre (Fine et Stolper, 1986; McCord et al., 1998a). Les complexes silicatés offrent également d'excellents sites d'adsorption, les cations, compensateurs de charge, sont souvent placés dans les interstices de ces matériaux, et deviennent alors des sites d'adsorption accessibles. Par ailleurs, la physisorption est inversement proportionnelle à la température, mais proportionnelle à la pression d'équilibre de gaz, à la surface d'échange et à la microporosité de surface (Chiou, 2002). La glace d'eau amorphe peut également capturer le CO_2 et le maintenir comme une espèce dissoute ou sous forme de clathrates (Bar-nun et al., 1985; Prialnik et Bar-Nun, 1990). Le gaz peut être retenu ainsi à condition de ne pas dépasser une pression de vapeur critique (Notesco et Bar-Nun, 1997). De plus, la pulvérisation de la glace en surface par les effets des rayonnements contribue à la capture du CO_2

et d'autres gaz en surface lors de la re-déposition de la glace (ou dans la formation de nuages de poussières moléculaires), (Whittet et al., 1996; Gerakines et al., 1999; Ehrenfreund et al., 1996, 1997, 1999; Sandford et al., 2001; Hohenberg et al., 2002; Collings et al., 2003). La physisorption du dioxyde de carbone sur une matrice de glace est tout à fait possible sur les surfaces qu'offrent les satellites joviens et saturniens (Hansen et McCord, 2004). Les études expérimentales montrent que la glace amorphe adsorbe davantage le dioxyde de carbone que la glace cristalline (Stevenson et al., 1999; Gàlvez et al., 2008). En outre, les expérimentations sur l'adsorption du CO_2 sur des matériaux argileux montrent que la signature spectrale dépend fortement de l'adsorbant (Hibbitts et Szanyi, 2007). L'adsorption de dioxyde de carbone sur du Ca-montmorillonite à 125 K présente une bande ν_3 similaire en position et en forme avec les observations sur satellites de glace (Hibbitts et Szanyi, 2007).

Les connaissances sur les matériaux de glaces d'eau et de CO_2 vont maintenant permettre d'étudier l'influence du dioxyde de carbone sur le mélange des deux glaces ou sur la structure clathrate. Les paragraphes suivants sont dédiés à la présentation des mélanges des deux matériaux et aux clathrates de CO_2.

La glace d'eau étant omniprésente dans le système solaire externe, le CO_2 entre donc inévitablement en contact plus ou moins intime avec elle à diverses températures et dans différentes proportions. L'interaction entre ces deux composants provoque inéluctablement des changements dans les spectres infrarouges de l'un et l'autre (Sandford et Allamandola, 1990; Dartois et al., 1999; Ehrenfreund et al., 1999; Palumbo et Baratta, 2000; Bernstein et al., 2005). Les études expérimentales sur les mélanges indiquent que la signature spectrale du mélange n'est pas la superposition des spectres des matériaux purs (Dalton, 2010). Des figures spectrales comme l'apparition d'une

transition interdite, le dédoublement de bandes ou la disparition de transitions, sont observables (Bernstein et al., 2005, 2006). La modélisation de spectres par les méthodes de mélanges linéaires n'est pas suffisante pour expliquer les caractéristiques spectrales des mélanges. Des études expérimentales, empiriques, doivent être effectuées pour comprendre le comportement des mélanges et aiguiller la conception de nouveaux modèles mieux adaptés à ces conditions (Dalton, 2010). Par ailleurs, les études expérimentales déjà effectuées sur le mélange des glaces d'eau et de CO_2 montrent que la signature spectrale présente un effet significatif de l'eau, même à faibles concentrations (Kieffer, 1970). L'eau a tendance à cacher la présence du CO_2 dont les caractéristiques au delà de 3 μm ne sont plus discernables. Une couche d'eau (7 mg.cm^{-2}), au dessus d'une couche de CO_2 peut effacer totalement la présence du dioxyde de carbone, alors qu'une couche de CO_2 de 50 mg.cm^{-2} est nécessaire pour couvrir la signature de l'eau (Kieffer, 1970). En outre, aucun signe spectroscopique n'a pu révéler la présence du complexe H_2O-CO_2 dans les mélanges des deux glaces (Jacox et Milligan, 1961; Kieffer, 1970). L'application de l'étude des mélanges eau-CO_2 solides se tourne principalement vers Ganymède et Callisto, sur lesquels la signature spectrale de mélange de glace est observée.

Les scientifiques s'attendent depuis longtemps à observer une abondance de clathrates dans le système solaire, (Miller, 1961, 1985; Lewis, 1971; Stevenson, 1982; Lunine et Stevenson, 1985; Kargel et Lunine, 1998; Kargel et al., 2000), mais sous la surface des planètes, ou éventuellement en surface dans un état métastable. En effet, les conditions de pression et de température ne sont pas favorables à la stabilité des clathrates de CO_2 en surface. Si leur origine est endogène, ils ont dû se former par adsorption et capturer des volatils durant la condensation de la glace d'eau de la nébuleuse

solaire (Iro et al., 2003; Hersant et al., 2004; Owen et Bar-Nun, 1995). La caractérisation de ces clathrates serait alors une information essentielle sur la composition de la nébuleuse solaire. Dans le cas d'Europe, les volatils auraient été capturés par l'océan ou la croûte de glace en surface, et les clathrates pourraient être issus de la réaction entre les gaz de l'océan et la croûte de glace (Prieto-Ballesteros et al., 2005). La quantité de CO_2 (évaluée de 0,1 à 10 %) présent dans la croûte de glace d'Europe est suffisamment importante pour former des clathrates ou pour enrichir de façon notable l'océan global (Prieto-Ballesteros et al., 2005). Si la fraction massique des clathrates dans les mélanges eau-gaz glacés est de 2,6 à 7,4 fois la fraction massique de gaz, alors les clathrates peuvent constituer un pourcent de la croûte de volatils d'Europe. Cette hypothèse est envisageable si la croûte de volatils est solide. Si l'océan est liquide, les gaz à l'origine de la formation des clathrates en excès par rapport aux clathrates pourraient être dissous dans l'océan liquide. Les clathrates pourraient être des constituants majeurs de la croûte d'Europe (Prieto-Ballesteros et al., 2005). Par contre, si l'origine du dioxyde de carbone est exogène, *i.e.* comme un résultat des bombardements de la surface par des matériaux carbonatés cométaires et/ou météoritiques, alors la formation des clathrates est issue d'un processus d'ensevelissement des dépôts de surface altérés par radiolyse (Prieto-Ballesteros et al., 2005). Cependant, la sublimation et la pulvérisation de la glace doit éroder la surface et faire apparaître les matériaux de la subsurface. Le dioxyde de carbone est donc soit produit par la radiolyse, soit exposé par le même phénomène. Si la source du CO_2 est interne, alors des clathrates ont pu se former si l'abondance en gaz est suffisante au point de formation. De plus, la présence de cryovolcans (Crawford et Stevenson, 1988; Fagents et al., 2000; Kargel et Lewis, 1993; Kargel et Pozio, 1996; Kargel et al., 2000) suggèrent également la formation de clathrates.

La détection des clathrates de CO_2 sur les surfaces planétaires en spectroscopie infra-

rouge reste difficile. En effet, sa signature spectrale est faiblement différente de celle de la glace, (Bertie et al., 1975; Bertie et Devlin, 1983; Smythe, 1975), les résolutions spectrale et spatiale actuelles des spectro-imageur NIMS (25 nm) et VIMS (16,6 nm) ne sont sans doute pas suffisantes pour les détecter. De plus, la répartition des clathrates n'est pas idéale, puisque ce sont des surfaces naturelles, les matériaux recherchés sont mélangés avec d'autres qui peuvent éventuellement cacher leur signature propre. Les études expérimentales en spectroscopie infrarouge sur les clathrates de CO_2 permettront d'augmenter les chances de les détecter (ou de prouver leur absence) à la surface des satellites de glace et des autres planètes observées.

Cette section a décrit l'historique et les objectifs des missions Cassini-Huygens et Galileo ainsi que les instruments VIMS et NIMS à leur bord qui sont à l'origine de toutes les données de l'études. Ces données sont des spectres infrarouges acquis à la surface de différentes lunes de glace des systèmes de Saturne et Jupiter. Quelques unes de ces lunes ont fait l'objet d'une étude plus détaillée.

I.2 Les lunes au cœur de l'étude

Quatre lunes ont été choisies comme objets d'application de notre étude. Encelade, satellite de Saturne, est recouvert de glace d'eau quasiment pure. L'absence d'atmosphère permet une parfaite observation de sa surface en spectroscopie infrarouge. De plus, les anomalies thermiques présentes au niveau de son pôle sud, serviront d'application à l'étude présentée dans le chapitre III sur la variation de la signature spectrale de la glace d'eau avec la température et la taille de grains. Par ailleurs, les satellites joviens découverts en 1610 par Galilée, ont été observés de manière plus précise grâce aux nouvelles techniques développées dans les années 70 pour identifier leur composition.

Orbitant autour de Jupiter, Ganymède, Callisto et Europe errent dans sa magnétosphère, immergés dans le plasma jovien et bombardés sans relâche par des particules chargées de haute énergie attirées par le fort champ magnétique de la planète géante. Leur atmosphère ténue, voire inexistante, permet d'étudier facilement leur surface et d'analyser les interactions entre les glaces d'eau et de dioxyde de carbone déjà identifiées. Cette section se découpe en quatre parties, chacune d'entre elles présente la géologie et la composition de chacune des lunes étudiées.

I.2.1 Encelade

Découvert en 1789 par Herschel (1790), Encelade, figure I.14, est le sixième plus large satellite de Saturne. Cette partie se découpe en deux paragraphes, le premier présente les caractéristiques de surface d'Encelade et le second sa composition.

Géologie

Après sa découverte, près d'un siècle s'est écoulé avant d'obtenir des informations sur Encelade. Les sondes spatiales Voyager 1 et 2 ont permis d'identifier la présence de glace d'eau à sa surface extrêmement brillante (Terrile et Cook, 1981). Le diamètre du satellite a été évalué à 500 km, près d'un dixième de celui Titan. Voyager 1, en 1980, a remarqué le lien entre l'orbite d'Encelade et l'anneau E de Saturne, indiquant par conséquence une relation possible entre les deux objets (Terrile et Cook, 1981). Voyager 2, quant à lui, a révélé, malgré la petite taille du satellite, différents types de terrains (Rothery, 1999). Les régions fortement cratérisées sont considérées comme vieilles et les régions jeunes présentent un sol extrêmement déformé par des processus géologiques, (figure I.14). Dès 2005, l'arrivée de la mission Cassini permet d'effectuer de

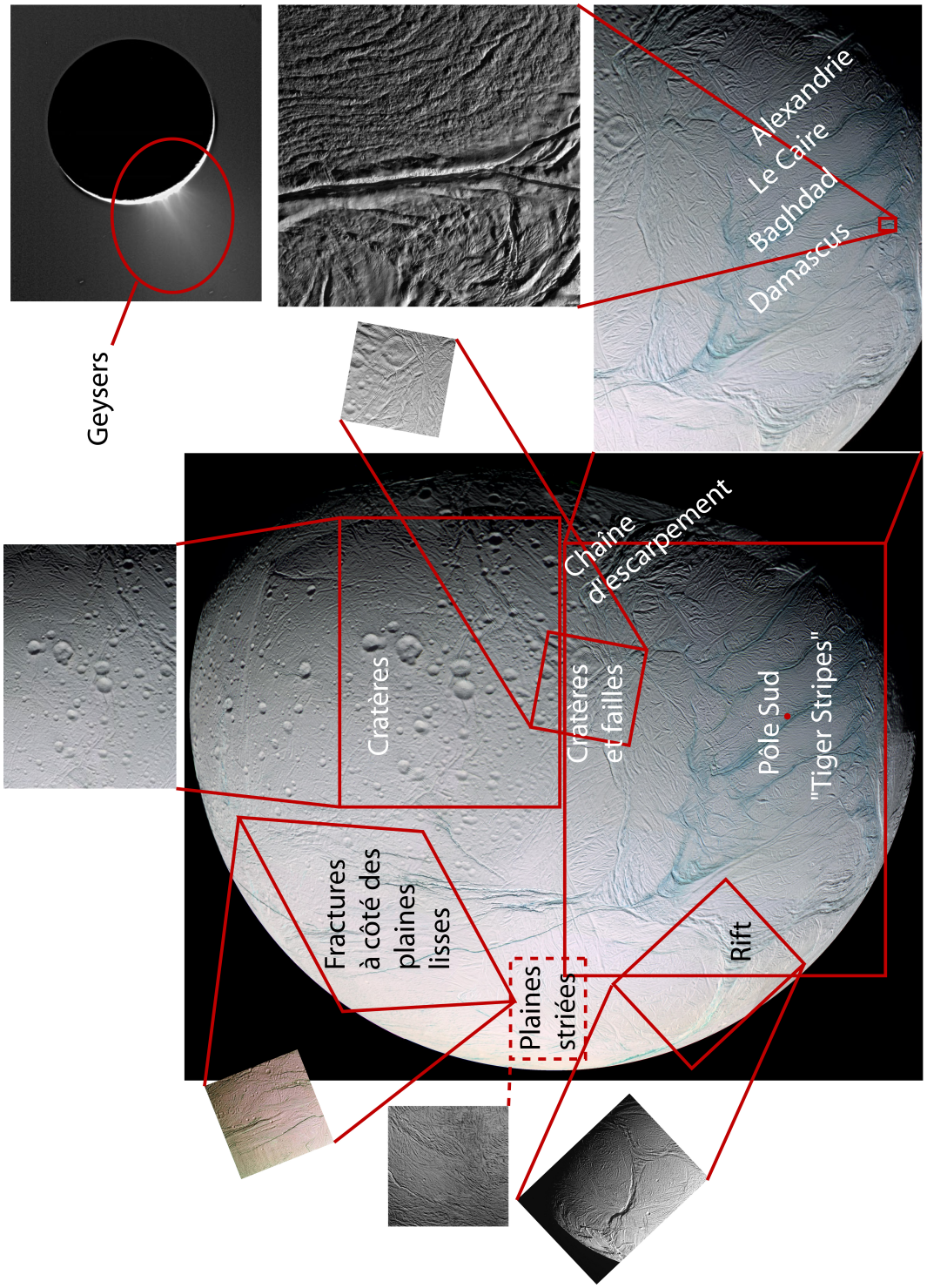


FIGURE I.14 – Photographies d'Encelade et des différentes unités géologiques observables à sa surface.

multiples survols du satellite et d'obtenir ainsi des informations détaillées sur le satellite. En particulier, les premières observations mettent en évidence la présence de geysers, (figure I.14), riches en eau sortant du pôle sud d'Encelade (Spencer et al., 2006). Ces panaches sont issus de grandes et longues failles, appelées « Tiger Stripes », (Spitale et Porco, 2007), (figure I.14). La vapeur de ces geysers a été étudiée par différents instruments de Cassini. Hansen et al. (2006) avec UVIS concluent que les panaches alimentent l'anneau E de Saturne en eau. Porco et al. (2006) avec ISS mesurent le satellite (513 km $\times$ 503 km $\times$ 497 km) et établissent des cartes d'Encelade, en particulier du pôle sud. Waite et al. (2006) avec INMS détaillent la composition chimique des plumes et Spahn et al. (2006) avec CDA confirment l'activité géologique intense du pôle sud. L'orbite d'Encelade, située à 238 000 km du centre de Saturne et à 180 000 km des plus haut nuages, est située au niveau le plus dense de l'anneau E. Entre les orbites de Mimas et Thétys, celle d'Encelade se maintient à une excentricité de 0,0047 grâce à sa résonance 2 : 1 avec Dione, *i.e.* Dione effectue deux tours de Saturne quand Encelade n'en fait qu'un. Cette résonance fournit une source de chaleur à l'activité géologique d'Encelade (Porco et al., 2006). De plus, la forme d'Encelade suggère une vibration spin-orbite de 1 : 4, (Porco et al., 2006), qui augmenterait sa source de chaleur. La puissance dégagée par le satellite doit être au moins de 6 GW, (Spencer et al., 2009), le maintien de sa chaleur et de son état de dissipation n'est pas encore bien compris. Plusieurs questions restent sans réponses quant à l'intérieur d'Encelade. Cependant, la densité du satellite est évaluée à 1,68 g.cm^{-2}, ce qui laisse penser que ce corps est probablement différencié avec un cœur de silicates, mais aucune preuve directe ne permet de le confirmer (Spencer et al., 2009). Un océan liquide entre le cœur silicaté et la croûte d'eau est supposé par de nombreux modèles (Nimmo et Pappalardo, 2006; Schubert et al., 2007; Tobie et al., 2008). En outre, deux mécanismes distincts proposent une explication à l'apport de par-

ticules à l'anneau E (Spahn et al., 2006). La première source de particules vient des panaches cryovolcaniques du pôle sud d'Encelade. Tandis que la majorité des particules expulsées retombent à la surface, (Schmidt et al., 2008), quelques-unes s'échappent de l'attraction gravitationnelle d'Encelade, (Spencer et al., 2006), pour entrer en orbite autour de Saturne. Le second mécanisme propose comme source des particules des bombardements météoritiques qui auraient expulsé des particules de poussière loin de la surface. Ce deuxième mécanisme est applicable à l'ensemble des lunes de Saturne situées à l'intérieur de l'anneau E.

L'observation visible détaillée d'Encelade, (Roatsch et al., 2008), à la plus haute résolution, met en évidence quatre types de terrains : des terrains cratérisés, des terrains lisses, des terrains fracturés et les « Tiger Stripes ».

i) Les terrains cratérisés, figure I.14, s'étendent du nord au sud quasiment de manière continue sur une bande (Spencer et al., 2009). Les cratères, de petites et de grandes tailles (à l'échelle du kilomètre), sont souvent de forme circulaire. Les grands cratères présentent des états de relaxation visqueuse différents, (Smith et al., 1982; Passey, 1983; Moore et al., 2004b), dont les reliefs topographiques sont variés : des sols bombés ou creux et des cratères aux bords plus ou moins arrondis.

ii) Les terrains lisses (270°W - 0°), très peu cratérisés et fracturés, sont probablement jeunes, datant de quelques centaines de millions d'années. Par conséquent, Encelade doit avoir une activité récente proche d'un « volcanisme aqueux » ou d'autres processus de renouvellement de surface, figure I.14. Cela donne au satellite la surface la plus brillante de tous les corps du système solaire et une température moyenne plus froide que les autres satellites saturniens (Spencer et al., 2006). Ils sont traversés par de longues failles qui indiquent la présence de forces de

compression (Passey, 1983). Ces terrains lisses, bien que traversés par des failles, restent bien distincts des terrains fracturés (60°W - 150°W).

iii) Les terrains fracturés, figure I.14, sont fortement striés, (Kargel et Pozio, 1996), et présentent des figures de fluage comme sur la surface des glaciers (Smith et al., 1982; Squyres et al., 1983a; Kargel et Pozio, 1996; Kargel, 2006; Porco et al., 2006).

iv) La dernière région est le pôle sud d'Encelade qui a pour particularité de présenter quatre grandes failles quasiment parallèles géologiquement actives qui traversent toute la zone (Porco et al., 2006). Cette région, figure I.14, est bordée par une proéminente chaîne d'escarpements en forme d'arcs tournés vers le sud (Porco et al., 2006). La région centrale est plus basse de 500 m ou plus par rapport au niveau moyen (Thomas et al., 2007a). Les Tiger Stripes sont des failles de 500 m de profondeur, 2 km de large et 130 km de long. Ils sont bordés par des épaulements de 100 m de haut. Leur nom officiel est Alexandria, Cairo, Baghdad et Damascus Sulci. Au niveau de ces failles, des anomalies thermiques ont été détectées avec CIRS sur Cassini et la température mesurée en surface peut atteindre 167 K (Spencer et al., 2009). La région du pôle sud d'Encelade est la zone d'intérêt de cette étude.

Composition

Les spectres de la surface d'Encelade obtenus par VIMS montrent que la lune n'est quasiment recouverte que de glaces cristalline (Brown et al., 2006), et amorphe (Newman et al., 2008). La glace cristalline dont la taille de grains varie entre 50 et 150 μm, (Brown et al., 2006), est principalement observée sur les Tiger Stripes (Newman et al.,

2008). Dès qu'on s'en éloigne, de la glace amorphe dont la taille est entre 100 et 300 μm, (Brown et al., 2006), est détectée par l'absence du pic de Fresnel à 3,1 μm et la profondeur de la bande à 1,65 μm (Newman et al., 2008). Ce pic est caractéristique de la glace cristalline. Du dioxyde de carbone, piégé dans une matrice de glace, a également été remarqué (figure I.15) sous forme d'inclusions liquides ou gazeuses (Brown et al., 2006). Des traces de matériaux organiques ont pu être étudiées près des Tiger Stripes grâce à la détection de bandes à 3,44 μm et 3,53 μm, représentatives de la vibration de la liaison C-H. En revanche, aucune molécule de monoxyde de carbone (sous forme de glace ou de gaz) n'a été trouvée, contrairement aux prédictions de Lewis (1971). Il en va de même pour les clathrates (Brown et al., 2006). Cependant, les pixels de VIMS manquent de précision (spectrale et spatiale). L'ammoniac est identifiable par de très faibles absorptions à 2,2-2,4 μm, (Grundy et al., 1999; Emery et al., 2005), mais Brown et al. (2006) ne détectent pas sa présence, ce qui signifierait que la quantité d'ammoniac serait limitée à moins de 2 % à la surface d'Encelade. La présence de peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) est déterminée par une absorption à 3,5 μm, (Newman et al., 2007), mais sa présence n'est pas certaine. Des acides et des sels hydratés, comme ceux détectés sur Europe, (McCord et al., 1998b), ont été cherchés en vain sur Encelade. L'analyse de la composition des geysers montre qu'ils sont principalement constitués de vapeur d'eau, de fines particules de glace, et de matière organique (Dalton et al., 2010). L'atmosphère est composée de vapeur d'eau ionisée, de dioxyde de carbone, de méthane et de molécules organiques (Coustenis et al., 2010-02-15). L'origine de ces geysers est encore inconnue, cependant, des hypothèses proposent une évaporation de la glace chauffée par des chambres d'eau liquide sous pression, ou encore la libération explosive des gaz d'éventuels clathrates contenus dans la glace (Porco et al., 2005, 2006; Kieffer et al., 2006). Par ailleurs, du sodium, soluble dans l'eau liquide mais pas dans la glace, a été

détecté dans les particules de l'anneau E ; cet élément est directement issu de la subsurface d'Encelade (détecté dans les geysers) et supporte l'hypothèse d'un océan d'eau liquide sous la croûte de glace. La géologie et la composition du satellite de glace Encelade ont été décrites dans cette première partie. Cette lune fait l'objet de l'application sur l'étude de la glace cristalline pure en laboratoire (voir Chapitre III). Les satellites de Jupiter, dont la position dans le système jovien leurs attribue une relation de résonance entre eux, ont également été étudiés. L'évaluation de leur masse, (De Sitter et al., 1915), et de leur diamètre, (Hollingsworth Smith, 1978), permet de déduire leur densité. Leur différence de densité met en évidence des compositions internes de roches distinctes mais aussi des états d'avancement inégaux de différenciation.

I.2.2 Callisto

Callisto (figure I.16), le plus lointain des satellites de glace galiléens, est une lune de 5000 km de diamètre et possède une masse de 10^{23} kg et une densité de 1,834 g.cm^{-3} (Anderson et al., 2001). Cette partie se découpe en deux paragraphes, le premier présente les caractéristiques de surface de Callisto et le second sa composition.

Géologie

La température de surface de Callisto est en moyenne de 134 K, (Moore et al., 2004a), comprise entre 80 et 165 K pour une pression atmosphérique (composée de dioxyde de carbone et d'oxygène moléculaire) de 7,5 pbar (Carlson, 1999). Callisto possède l'albédo le plus bas par rapport aux autres satellites avec un hémisphère relativement sombre (Stebbins et Jacobsen, 1928; Morrison et al., 1974). Globalement, Callisto apparaît comme une sphère couverte d'impact de cratères, (Moore et al., 2004a),

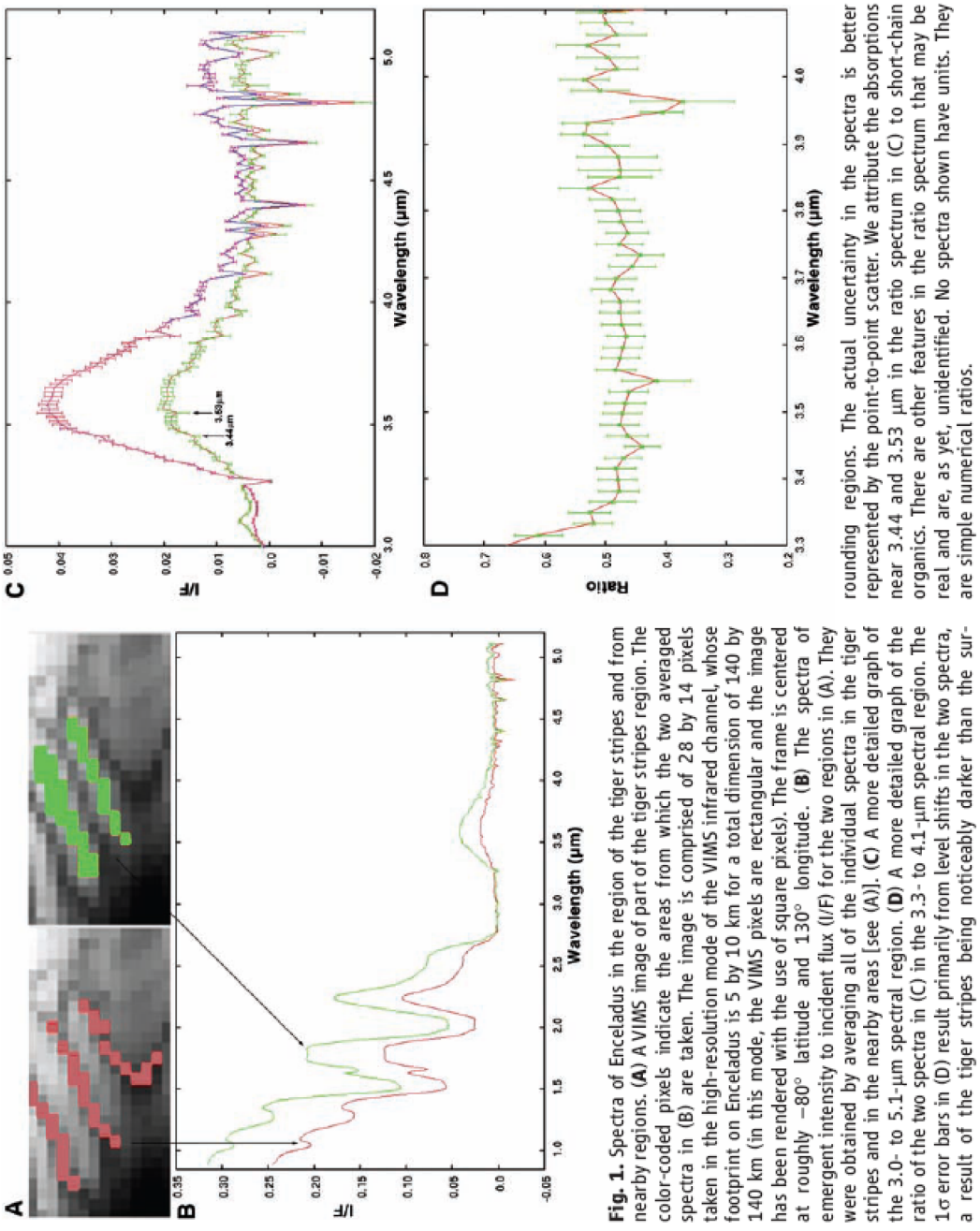


Fig. 1. Spectra of Enceladus in the region of the tiger stripes and from nearby regions. (**A**) A VIMS image of part of the tiger stripes region. The color-coded pixels indicate the areas from which the two averaged spectra in (B) are taken. The image is comprised of 28 by 14 pixels taken in the high-resolution mode of the VIMS infrared channel, whose footprint on Enceladus is 5 by 10 km for a total dimension of 140 by 140 km (in this mode, the VIMS pixels are rectangular and the image has been rendered with the use of square pixels). The frame is centered at roughly −80° latitude and 130° longitude. (**B**) The spectra of emergent intensity to incident flux (I/F) for the two regions in (A). They were obtained by averaging all of the individual spectra in the tiger stripes and in the nearby areas [see (A)]. (**C**) A more detailed graph of the 3.0- to 5.1-μm spectral region. (**D**) A more detailed graph of the ratio of the two spectra in (C) in the 3.3- to 4.1-μm spectral region. The 1σ error bars in (D) result primarily from level shifts in the two spectra, a result of the tiger stripes being noticeably darker than the surrounding regions. The actual uncertainty in the spectra is better represented by the point-to-point scatter. We attribute the absorptions near 3.44 and 3.53 μm in the ratio spectrum in (C) to short-chain organics. There are other features in the ratio spectrum that may be real and are, as yet, unidentified. No spectra shown have units. They are simple numerical ratios.

FIGURE I.15 – Extrait de Brown et al. (2006). Photographies et spectres de la surface d'Encelade.

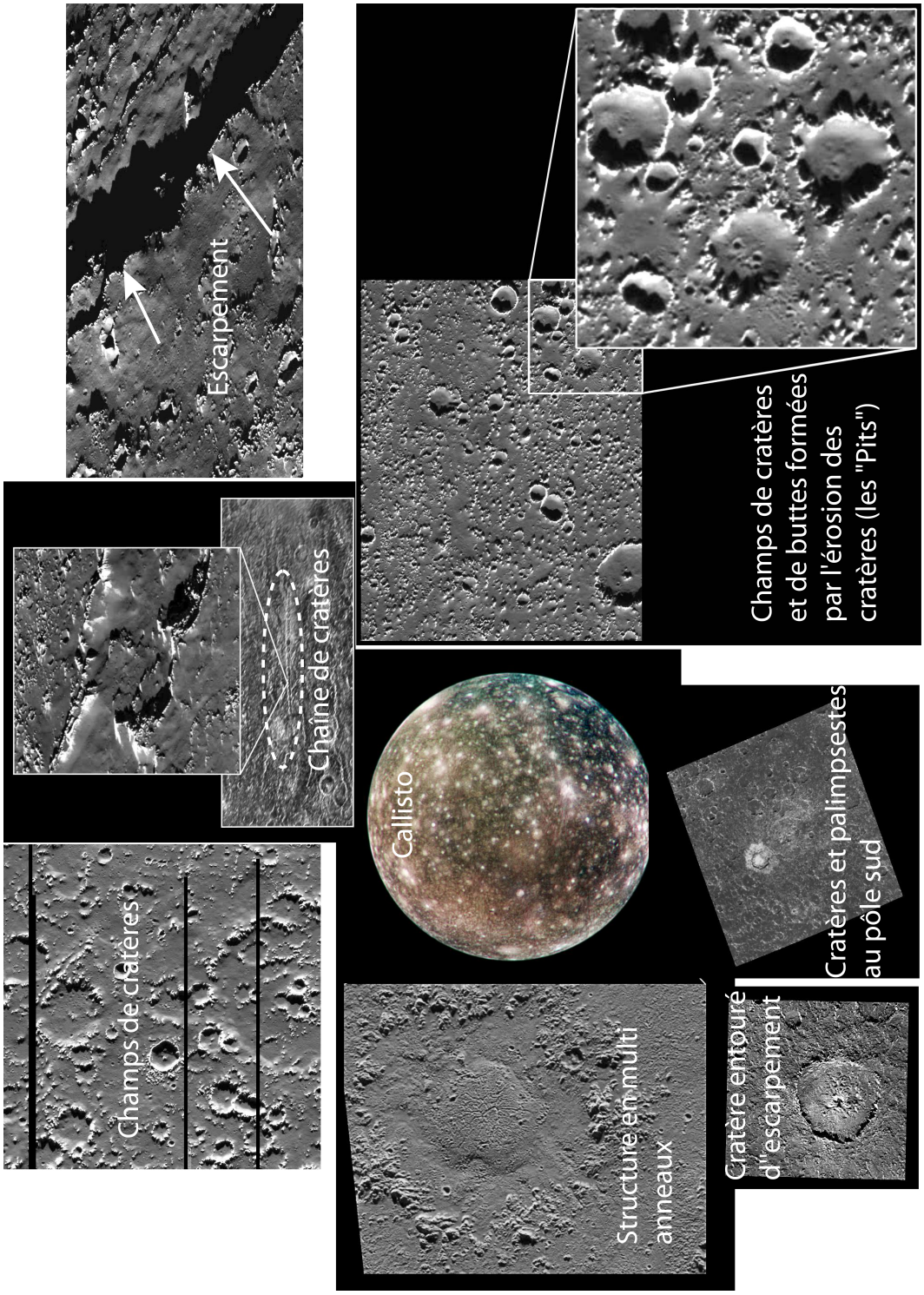


FIGURE I.16 – Photographies de Callisto et des différentes unités géologiques observables à sa surface.

figure I.16. Cependant, à très haute résolution, la surface, initialement sculptée par des impacts, a été massivement érodée et présente dans certaines régions un champ sombre formé des petites buttes de détritus (Moore et al., 2004a). Galileo a tourné ses caméras sur Callisto à douze reprises. Les objectifs scientifiques de la caméra SSI dont le planning fut effectué par Carr et al. (1995), étaient de comprendre l'origine et les processus de formation des différentes structures (figure I.16) par l'examination de la morphologie des :

- structures multi-anneaux, incluant les escarpements, les rides et les creux,
- palimpsestes, ou cratères « fantômes »,
- cratères d'impact formés dans la glace,
- chaînes de cratères,
- dépôts de matériaux endogènes.

Les zones non imagées par Voyager ont également pu être étudiées, de même que la présence et la mobilité des grains de givre volatils aux hautes latitudes (Moore et al., 2004a). SSI et NIMS ont souvent observé en même temps pour compléter les données.

Composition

Composé d'eau majoritairement (Lewis, 1972a,b), la spectroscopie infrarouge de la surface de Callisto a permis d'établir la présence d'autres constituants. De nombreux minéraux ou matériaux hydratés non identifiés, des traces de dioxyde de carbone et de soufre font partie de la liste. Leur éventuelle identification ne permet pas d'être certain sur leur état physique, sur leur liaison chimique avec d'autres constituants ou seulement leur mélange avec une matrice de glace (Hibbitts et al., 2001). Certains matériaux sombres non glacés ont été détectés et éventuellement associés à des chondrites carbonées (Clark, 1980). Les liaisons Mg-OH identifiées sont assimilées à la présence de

phyllosilicates comme des argiles mais aucun minéral spécifique ne peut être identifié avec la résolution spectrale existante. Les bandes d'absorption des spectres montrent que la glace d'eau est le constituant majoritaire de Callisto. La modélisation de ces bandes donne des indications sur la taille de grains et/ou sur la pureté de la glace (Clark, 1980, 1981a; Clark et Lucey, 1984). Clark (1980) a découvert la bande d'absorption à 1,04 μm sur la signature spectrale de Callisto. Avec les modélisations de spectres, la présence de cette bande indique une abondance de glace d'eau ou une quantité moindre de gros grains de glace. L'étude du spectre global a montré par modélisation que le sol de Callisto était un mélange intime de glace d'eau et de matériaux sombres comme des minéraux hydratés (Calvin et Clark, 1991). D'autres absorptions suggèrent la présence de silicates hydratés, *i.e.* des caractéristiques spectrales correspondent à des mélanges de fer et de magnésium. Par ailleurs, les chondrites carbonées qui contiennent du fer pourraient être un des matériaux non glacés de Callisto. Roush et al. (1990) proposent un modèle représentatif du domaine spectral autour de 3 μm intégrant un mélange de serpentine, de gros grains de glace et de la magnétite. En revanche, Calvin et Clark (1993) suggèrent plutôt la présence de fins grains et expliquent une bande à 3,1 μm avec de l'ammoniac (NH_3). McCord et al. (1997, 1998a) suggèrent, par la présence de plusieurs bandes d'absorption, la présence des liaisons C-H, S-H et C-N ainsi que les molécules CO_2 et SO_2. Le dioxyde de carbone est un constituant minoritaire sur Callisto, cependant, NIMS a permis de révéler sa présence avec la bande à 4,25 μm (Carlson et al., 1996). D'après James et al. (1992), la glace de CO_2 ne devrait pas être stable sur Callisto puisque sa pression de sublimation varie de 0,04 à 3,1 mbar entre 120 et 160 K. De plus, la position de cette bande ne correspond pas à du dioxyde de carbone sous forme de givre ou de gaz mais peut être expliquée par le piégeage des molécules dans une matrice glacée (des inclusions fluides ou gazeuses), (McCord et al., 1998a).

Cette bande d'absorption a été détectée et est restée constante pendant plus de quatre ans d'après Hibbitts et al. (2000). Selon McCord et al. (1998a) et Hibbitts et al. (2000), la répartition globale sur Callisto de la bande à 4,26 μm montrerait la présence de CO_2 glace, supposant donc que la glace et les matériaux non glacés seraient situés dans les mêmes zones et seraient ainsi, intimement mélangés (Spencer, 1987).

I.2.3 Ganymède

Ganymède, figure I.17, le plus gros satellite du système solaire, est une lune de 5200 km de diamètre et possède une masse de $1{,}5.10^{23}$ kg et une densité de 1,936 g.cm^{-3} (Showman et al., 1999). Cette partie se découpe en deux paragraphes, le premier présente les caractéristiques de surface de Ganymède et le second sa composition.

Géologie

La température à la surface de Ganymède est en moyenne de 110 K, (Delitsky et Lane, 1998), comprise entre 70 et 152 K pour une pression atmosphérique quasiment nulle (quelques traces d'oxygène), (Hall et al., 1998). Ganymède est le seul satellite du système solaire à posséder un champ magnétique propre, ce qui laisse penser à l'existence d'un noyau liquide de fer (Kivelson et al., 2002). Deux types de terrains peuvent être identifiés à la surface du satellite : les terrains, très vieux, sont extrêmement cratérisés et sombres alors que les régions plus jeunes et plus claires sont marquées par de longues failles, figure I.17. Les terrains sombres qui recouvrent un tiers de la surface, (Petterson et al., 2007), sont composés d'argiles et de matériaux organiques qui indiquent la composition des objets à partir desquels se sont accrétés les satellites joviens (Pappalardo et al., 2001). Le mécanisme de chauffage requis pour la formation

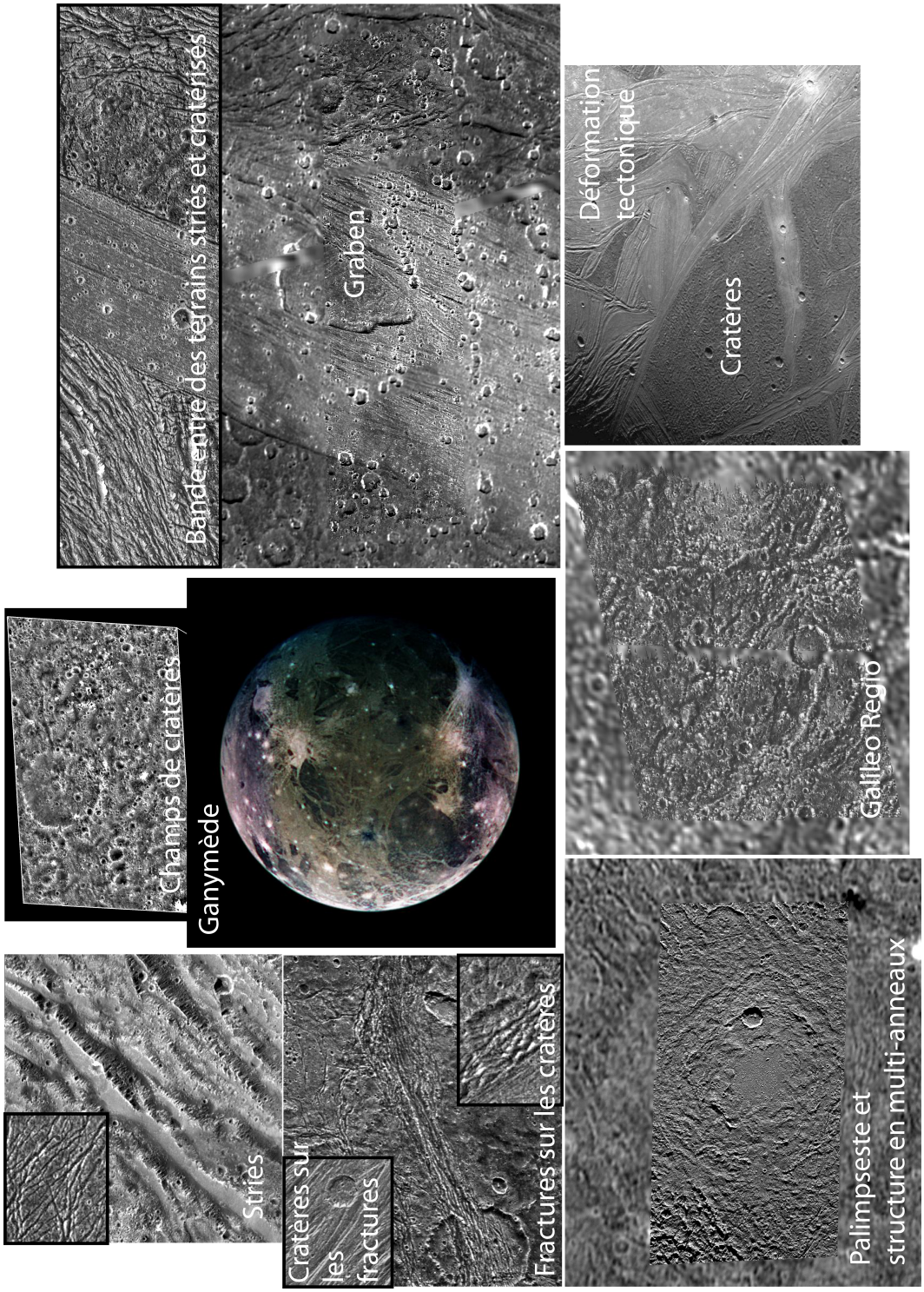


FIGURE I.17 – Photographies de Ganymède et des différentes unités géologiques observables à sa surface.

des terrains fracturés sur Ganymède n'est pas expliqué à l'heure actuelle. La naissance de tels terrains nécessite l'existence de processus tectoniques (Showman et al., 1999). *A priori*, le cryovolcanisme, s'il existe sur Ganymède, n'a joué qu'un rôle mineur quant à la formation de ces terrains (Showman et al., 1999). Les forces issues des contraintes nécessairement importantes dans la lithosphère de glace pour initier l'activité tectonique sont probablement reliées à des événements passés de chauffage de marée (peut être dû au passage d'un satellite par des résonances orbitales instables.), (Showman et al., 1997, 1999). Le réchauffement interne et la tension de la lithosphère provoqués par les mouvements de marée de la glace ont conduit à la formation de failles et de grabens, effaçant ainsi 70% des terrains sombres de la surface (Showman et al., 1999; Bland et al., 2007). La formation des terrains fracturés a également pu être reliée à la formation du noyau après l'accrétion et par conséquent au chauffage de marée de l'intérieur de la lune, ce qui a pu provoquer une légère expansion de Ganymède de 1 à 6 % par des transitions de phase dans la glace et l'expansion thermique (Showman et al., 1999). Pendant l'évolution des profondeurs du satellite, des geysers d'eau « chaude » ont pu sortir de la surface, provoquant ainsi les déformations tectoniques de la lithosphère (Barr et al., 2001). Les cratères sont présents sur les deux types de terrain, figure I.17, mais de manière plus fréquente sur les terrains sombres. Ces régions semblent saturées en cratères d'impact (Showman et al., 1999). Les terrains fracturés qui sont les plus brillants contiennent beaucoup moins de figures d'impact. La densité de cratère indique un âge pour les terrains sombres de 4 milliards d'années, équivalent aux highlands lunaires, et un âge plus jeune pour les terrains clairs (Zahnle et al., 1998). Comme la Lune, Ganymède a connu une longue période de bombardement intensif, il y a 3,5 à 4 milliards d'années (Zahnle et al., 1998). La grande majorité des impacts ont alors dû se produire à cette époque, l'intensité de bombardement a bien diminué de nos jours. Les cratères

sont recouverts et traversés par les failles, ce qui indique que les fractures sont assez anciennes. Des cratères relativement jeunes présentant des formes étoilées dues aux éjecta sont également visibles. Les cratères de Ganymède sont plus plats que ceux de Mercure ou la Lune, ce qui est probablement dû à la nature relativement molle de sa croûte de glace qui peut fluer et adoucir le relief. D'anciens cratères dont le relief s'est effacé ne laissent derrière eux qu'un « fantôme » de cratère, connu sous le nom de palimpseste. La plaine sombre, nommée Galileo Regio, (figure I.17) est la figure la plus fascinante de Ganymède, contient une série de fractures concentriques (des « furrows ») dont la taille varie de quelques centaines de km au diamètre hémisphérique, (Hibbitts et al., 2009), probablement créées pendant une période d'activité géologique (Casacchia et Strom, 1984). Cette figure n'est pas unique, les processus de formation et de disparition des « furrows » sont étudiés par Hibbitts et al. (2009). Ganymède possède également des calottes polaires, probablement composées de glace d'eau qui s'étendent jusqu'à 40° de latitude (Miller, 2005). La théorie de la formation de ces calottes considère que l'eau a migré vers des latitudes plus hautes et que la glace a été bombardée par un plasma. Les données fournies par Galileo, suggèrent que cette dernière est correcte (Khurana et al., 2007). De plus, la présence du champ magnétique de Ganymède provoque un bombardement de particules chargées plus intense de la surface dans les régions polaires non protégées. La pulvérisation redistribue les molécules d'eau qui migrent localement vers des zones plus froides comme les terrains polaires (Khurana et al., 2007). La glace des calottes polaires, (Smith et al., 1979b,a), est donc interprétée comme le résultat d'un bombardement de particules chargées provoquant une pulvérisation de la glace qui se serait redéposée localement en givre (Johnson, 1985, 1997; Pappalardo et al., 1998b).

Composition

La densité moyenne de Ganymède (1,936 g.cm^{-3} (Showman et al., 1999)), suggère une composition répartie équitablement entre des matériaux rocheux et de l'eau, principalement sous forme de glace (Showman et al., 1999). La fraction massique de glace est entre 46 et 50%, légèrement plus basse que celle de Callisto (Kuskov et Kronrod, 2005). Des glaces volatiles comme l'ammoniac ont également été détectées en surface (Kuskov et Kronrod, 2005; Calvin et al., 1995). La composition exacte des roches de Ganymède n'est pas connue, mais elle est probablement proche de celle des chondrites ordinaires qui possèdent moins de fer, de fer métallique et d'oxyde de fer. Le rapport massique de fer sur silicium varie entre 1,05 et 1,27 pour Ganymède alors que ce rapport est autour de 1,8 pour le soleil (Kuskov et Kronrod, 2005). La surface de Ganymède est composée de glace d'eau et d'un matériau sombre non glacé qui est un mélange de différents constituants, (Pilcher et al., 1972; Pollack et al., 1978; Clark et Mc Cord, 1980), et présente un albédo autour de 0,43 (Calvin et al., 1995). La spectroscopie proche infrarouge montre la présence des bandes d'absorption de la glace d'eau à 1,04, 1,25, 1,5, 2 et 3 μm (Calvin et al., 1995). Les terrains fracturés, plus brillants, ont une composition plus riche en glace d'eau que les terrains sombres. L'analyse haute résolution des sols avec des spectres UV et proche IR obtenus par Galileo, révèle l'existence de plusieurs composants autres que la glace d'eau, tels que le dioxyde de carbone, le dioxyde de soufre, (Nelson et al., 1987), et probablement, du cyanogène, des sulfates d'hydrogène, de l'ozone, (Noll et al., 1996; Hendrix et al., 1999), ou encore, la présence d'oxygène, (Spencer et al., 1995), et des constituants organiques (Showman et al., 1999; McCord et al., 1998a). Galileo a également montré la présence de sulfates de magnésium ($MgSO_4$) et de sulfates de sodium (Na_2SO_4) à la surface de Ganymède, (McCord

et al., 2001a; Miller, 2005), reconnus par la forme asymétrique des bandes d'absorption de la glace d'eau (McCord et al., 2001a). Cette asymétrie est représentative des sels hydratés mais pourrait également être provoquée par la présence de minéraux hydratés (Carlson et al., 1999b). Ces sels pourraient provenir d'un océan en subsurface (McCord et al., 2001a). Le dioxyde de carbone a été découvert à la surface de Ganymède grâce à la bande d'absorption à 4,26 μm des spectres en réflectance de NIMS (Carlson et al., 1996; McCord et al., 1998a). Comme pour Callisto, McCord et al. (1998a) pensent que le dioxyde de carbone est lié à, ou piégé dans, une matrice hôte, d'après la forme et la position de la bande d'absorption. De plus, d'après James et al. (1992), la pression de sublimation du CO_2 varie de 10^{-4} à 10 torr quand la température passe de 100 à 160 K ; la matrice hôte retiendrait le dioxyde de carbone à la surface (Orton et al., 1996). La carte de répartition du dioxyde de carbone à la surface de Ganymède, l'hémisphère anti-jovien, (McCord et al., 1998a), décrit une surface tachetée de CO_2, avec une teneur plus faible aux hautes latitudes. McCord et al. (1998a) pensent que cette baisse de teneur en CO_2 sur les spectres est due à la présence de grains de glace d'eau plus fins, ce qui cacherait les bandes de dioxyde de carbone. La forme de la bande d'absorption du dioxyde de carbone sur Ganymède est très similaire à celle de Callisto, (Hibbitts et al., 2000), mais différente du CO_2 cristallin à 80 K, d'après Hibbitts et al. (2003) qui comparent les spectres naturels aux spectres modélisés à partir des constantes optiques obtenues par Warren (1986) et issus d'un travail en laboratoire réalisé par Yamada et Person (1964). Les bandes d'absorption du CO_2 normalisées sont ajustées au mieux par des courbes Gaussiennes sur 14 observations (Hibbitts et al., 2003). Le minimum de réflectance est obtenu, pour Ganymède et Callisto, à 4,257 μm mais la bande d'absorption est légèrement plus large et plus symétrique sur Callisto (Hibbitts et al., 2003). Cette différence peut être due à la calibration et la résolution de NIMS. Par ailleurs, sur

des données normalisées et sans contribution d'un continuum, une bande d'absorption à 4,37 μm est détectée sur la modélisation du spectre de CO_2 sur Ganymède (Hibbitts et al., 2003). Cette caractéristique spectrale est plus fine que celle observée sur Callisto mais similaire en position (McCord et al., 1998a; Hibbitts et al., 2000). Cette bande d'absorption est présente sur le spectre de glace cristalline de CO_2 mais avec un décalage en longueur d'onde (Hibbitts et al., 2003). Sa présence pourrait être due à $^{13}CO_2$ mais sa faible profondeur implique une interprétation équivoque (Hibbitts et al., 2003).

I.2.4 Europe

Sixième lune de Jupiter, Europe, figure I.18, est le plus petit des satellites de glace galiléens avec 3104 km de diamètre pour $4{,}825.10^{22}$ kg et une densité de 3,081 g.cm^{-3} (Lupo et Lewis, 1979). Cette partie se découpe en deux paragraphes, le premier présente les caractéristiques de surface d'Europe et le second sa composition.

Géologie

La température de surface d'Europe est comprise entre 100 et 150 K, (Spencer et al., 1999), pour une pression atmosphérique de 0,1 μmPa, soit 1 pbar (McGrath, 2009). Sous sa surface apparemment lisse et jeune, Europe possède certainement un océan d'eau liquide, (Carr et al., 1998), à l'intérieur duquel la question de l'habitabilité se pose (Reynolds et al., 1983).

Les premières cartes géologiques d'Europe ont été réalisées grâce aux données de Voyager (Lucchitta et Soderblom, 1986). La meilleure résolution était de 1,9 km par pixel mais ces images ne couvraient pas l'ensemble de la surface d'Europe. Avec l'arrivée de Galileo dans le système jovien en 1995, neuf survols d'Europe, de la mission

nominale, ont permis de compléter les cartes, (Belton et al., 1996; Greeley, 1997; Greeley et al., 1998), avec des images de 20 km par pixel. Neuf autres survols, de la mission étendue, ont permis d'obtenir des images dont la résolution était de 6 à 10 km par pixel (Senske et al., 1998; Prockter et al., 1999b).

Cinq unités géologiques ont été détectées en observant les cartes d'Europe (Greeley et al., 2000) : les constituants des plaines, les matériaux chaotiques, les unités contenues sur des bandes, celles sur les rides et enfin, les constituants des cratères. L'unité géologique qui forme les plaines est la plus répandue à la surface (Greeley et al., 2000). L'âge moyen de la surface d'Europe serait de 40 à 90 millions d'années selon Bierhaus et al. (2009). Les plaines peuvent être subdivisées en trois catégories de figures géologiques : les parties lisses, fracturées et non différenciées, figure I.18.

– **Les plaines lisses**

  La surface de cette unité, comme son nom l'indique, est lisse, avec des textures parfois visibles. L'albédo de ces surfaces est plutôt faible par rapport à l'ensemble de cette unité géologique. Les constituants des plaines lisses tendent à entourer et/ou à effacer les figures géologiques préexistentes. Ces parties de surface ont souvent des aires limitées et s'étendent de manière circulaire, figure I.18, suggérant que leur emplacement est topographiquement controlé (Greeley et al., 1998). Elles pourraient être le résultat d'une déposition de constituants faiblement visqueux sur la surface par un cryovolcan, (Greeley, 1997; Fagents et al., 1998; Wilson et Head, 1999), ou d'une fusion suivie d'une recristallisation des constituants de surface provoquée par une source localement chaude, (Pappalardo et al., 1998a; Head et al., 1999a), ou encore la combinaison des deux processus (Greeley et al., 1998).

– **Les plaines fracturées**

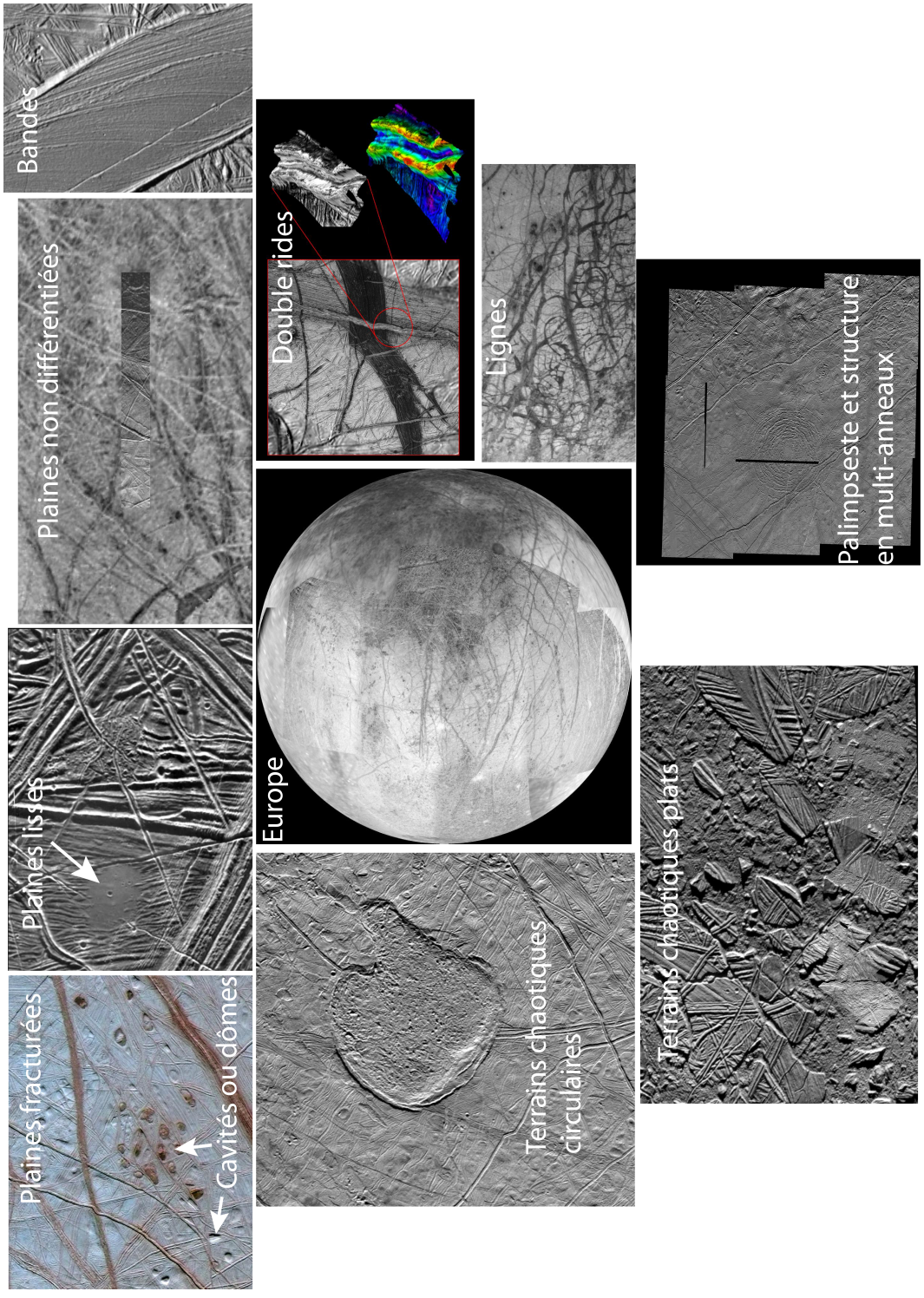


FIGURE I.18 – Photographies d'Europe et des différentes unités géologiques observables à sa surface.

Les zones de cette unité sont caractérisées par de multiples failles qui se recoupent. La forme de ces fractures varie fortement en longueur, largeur et état de préservation (Sullivan et al., 1999). Elles sont typiquement espacées d'une centaine de mètres mais localement, se croisent et sont peu organisées (Sullivan et al., 1999). Ces unités sont légèrement plus brillantes que les terrains environnants et possèdent un peu de relief topographique (Greeley et al., 2000). Les fractures, figure I.18, sont localement interrompues par des cavités naturelles ou des dômes (Greeley et al., 2000). Ces fractures qui varient par leur taille, leur orientation et leur croisement, suggèrent une formation épisodique (Geissler et al., 1998; Patel et al., 1999; Sullivan et al., 1999; Figueredo et Greeley, 2000). Plusieurs modèles proposent un développement des fractures par accumulation de débris suite à l'ouverture et à la fermeture successives des failles, (Greenberg et al., 1998), ou par une activité cryovolcanique, (Kadel et al., 1998; Fagents et al., 2000), ou encore par un diapirisme linéaire (Head et al., 1999c). La position de ces unités pourrait représenter une activité tectonique de renouvellement de surface (Head et al., 1997).

– **Les constituants des plaines non différentiés**

A l'échelle globale, les deux unités des plaines précédemment présentées, ne se différencient pas, les failles sont trops petites pour être détectées (Greeley et al., 2000). Ces constituants non différenciés, figure I.18, ont une texture lisse, localement tachetés par des cavités naturelles dont la taille varie de quelques kilomètres à une centaine de kilomètres, (Chapman et al., 1997; Williams et al., 1999) et par des massifs isolés dont la taille n'excède pas le kilomètre (Greeley et al., 1998). Cette unité est composée de constituants clairs et sombres (Belton et al., 1996; Geissler et al., 1998; Helfenstein et al., 1998). Ces plaines non différen-

tiées, constituées de régions lisses et fracturées ne contiennent pas d'autres unités visibles à l'échelle globale (Greeley et al., 2000). Les différences de couleur avec les analyses visibles et proches infrarouges peuvent s'interpréter comme une différence de taille de grains (Belton et al., 1996; Geissler et al., 1998).

Les terrains choatiques, figure I.18, caractérisés par des croûtes de glace plates de tailles différentes, s'intègrent dans une matrice légèrement surélevée (Greeley et al., 2000). Les matériaux chaotiques semblent s'étendre sur des unités préexistentes (Carr et al., 1998; Greeley et al., 1998). Ces régions font parties des plus jeunes d'Europe (Spaun et al., 1998; Prockter et al., 1999b; Kadel et al., 2000). Cependant, d'étroites lignes et des cratères coupent les terrains chaotiques (Greenberg et al., 1999; Figueredo et Greeley, 2000). Ces terrains se divisent en deux unités géologiques : les matériaux chaotiques plats et les matériaux chaotiques circulaires.

– **Les matériaux chaotiques plats**

  Ces unités géologiques, composées de blocs de constituants préexistants s'étendant de quelques kilomètres à des dizaines de kilomètres, sont entourées d'une matrice rocailleuse (Greeley et al., 2000). Les blocs, figure I.18, marqués par les caractéristiques géologiques, telles que des rides, des terrains dont ils proviennent, (Carr et al., 1998), semblent avoir tourné et s'être déplacés par rapport à leur position originelle. La matrice, quant à elle, est composée de terrains rocailleux légèrement surélevés dont émergent quelques buttes de plusieurs centaines de mètres, sans orientation particulière (Carr et al., 1998; Spaun et al., 1998). La formation de ce type de terrains proviendrait d'une remontée de composants des profondeurs vers la surface par chauffage ou différence de densité, (Collins et al., 2000) qui briserait la lithosphère de glace en blocs susceptibles de se mouvoir (Williams et Greeley, 1998).

– **Les matériaux chaotiques circulaires**

Ces terrains sont caractérisés par la présence de formes circulaires irrégulières situées au-dessus de la matrice environnante, figure I.18. Larges de trois kilomètres, ces unités sont entre une dizaine et quelques centaines de mètres au-dessus de la surface. Ces régions semblent s'être formées de manière analogue aux matériaux chaotiques plats. En revanche, les traces des figures géologiques préexistantes ont dû être effacées par chauffage (Head et al., 1999b). De plus, la hauteur de ces zones peut être expliquée par refroidissement de matériaux localement fondus, (Greenberg et al., 1999), ou par remontée de constituants en subsurface par cryovolcanisme ou diapirisme (Collins et al., 2000; Figueredo et al., 2000).

Les composants des bandes dont le nom provient de leur forme linéaire distinguable, de part son albédo et de sa texture de surface, des terrains environnants, sont divisibles en trois catégories : les bandes grises, les bandes claires et les bandes ridées (Smith et al., 1979a; Lucchitta et Soderblom, 1986). Certaines de ces bandes (figure I.18) présentent une morphologie lisse à l'intérieur avec des bords abrupts (Greeley et al., 2000). Cependant, de plus près, l'intérieur des bandes peut être formé d'une ride centrale. Cette variabilité dans les formes de ces bandes suggère différents mécanismes de formation ou le même mécanisme fondamental appliqué de différentes manières (Prockter et al., 1999a; Tufts et al., 2000). Les bandes pourraient représentées la dernière étape d'une évolution séquentielle dans laquelle les doubles rides et les rides complexes (décrits au paragraphe suivant) sont des étapes intermédiaires du processus (Pappalardo et al., 1998a; Geissler et al., 1998). D'autres modèles décrivent la formation des bandes ridées par la construction successive de rides (Greenberg et al., 1998).

Les rides, figure I.18, morphologies dominantes sur Europe, sont des figures linéraires, courbes ou circulaires. Ces rides peuvent être simples, doubles (deux rides sé-

parées par un sillon) ou complexes (plus de deux rides). La détection des différentes rides est très dépendante de la résolution des images et de l'illumination (Greeley et al., 2000). Plusieurs modèles proposent différents scénarios pour expliquer la formation des rides sur Europe : une accumulation des fragments de débris provenant d'une activité tectonique, (Greenberg et al., 1998), des processus cryovolcaniques, (Kadel et al., 1998), un réchauffement local accompagné d'un diapirisme linéaire, (Head et al., 1999c), des stries séquentielles, (Turtle et al., 1998), ou une compression des constituants (Sullivan et al., 1999).

Les cratères sont classés par âge. Les plus vieux représentent des palimpsestes, ou cratères « fantômes », (figure I.18) dont ils sont le centre de cercles concentriques (Greeley et al., 2000). Les cratères ont des centres et des contours de formes diverses.

Toutes ces figures géologiques suggèrent la présence d'activité tectonique sur Europe. Des geysers, comme sur Encelade, ont été cherchés en vain (Phillips et al., 2000). Cependant, le renouvellement de surface est long et épisodique. Des observations à de meilleures résolutions devraient permettre de distinguer plus clairement les différents processus géologiques existants.

Composition

Grâce à la mission Galileo et son spectro-imageur, NIMS, la composition de la surface d'Europe a pu être étudiée pour la première fois en relation avec les structures géologiques. Le spectro-imageur a pu, dans les premiers survols d'Europe, étudier la zone polaire nord dont la surface est constituée de glace d'eau pure (Carlson et al., 1996). La majorité de la surface d'Europe est recouverte de glace d'eau, (Pilcher et al., 1972; Clark et Mc Cord, 1980; Clark, 1980), cependant des constituants d'une autre nature paraissent rougeâtres et sombres au niveau des rides, des bandes et des terrains

chaotiques (Spaun et al., 1998; Fanale et al., 1999, 2000; Head et Pappalardo, 1999; Greeley et al., 2000). Les études des spectres infrarouges de ces régions, en particulier sur les terrains chaotiques, ont révélé des signatures similaires à la glace d'eau mais les bandes d'absorption étaient hautement déformées et décalées en longueur d'onde (McCord et al., 1998b, 1999). L'interprétation de ses signatures spectrales s'est tournée vers la présence de composants hydratés, tels que des sels minéraux hydratés, en particulier des sulfates de magnésium et de sodium, et des carbonates de sodium, probablement présents dans l'océan sous la croûte de glace (McCord et al., 2001a,b, 2002; Orlando et al., 2005; Dalton et al., 2005; Dalton, 2007). Les preuves de l'existence d'un océan en subsurface se sont accrues depuis la mission Galileo (Cassen et al., 1979; Squyres et al., 1983b; Pappalardo et al., 1999; Stevenson, 2000; Spaun et Head, 2001; Spohn et Schubert, 2003). Des efforts sont encore à faire pour déterminer précisément la composition de la surface d'Europe. L'épaisseur de la croûte de glace est encore incertaine, (McKinnon, 1999; Greenberg et al., 1999; Pappalardo et al., 1999; Kadel et al., 2000; Moore et al., 2001; Nimmo et Manga, 2002; Goodman et al., 2004), ce qui est une barrière pour la modélisation des processus géologiques et géophysiques qui influencent la composition de la surface (Kargel et al., 2000; Prieto-Ballesteros et Kargel, 2005). Les analyses des sols à distance sont les moyens les plus utilisés (dans le domaine spatial) pour déterminer leur composition. Cependant, beaucoup d'incertitudes sur leur histoire (origine endogène ou exogène, leur éventuelle modification chimique ou physique) restent en suspens. La compréhension des processus endogènes ou exogènes qui produisent une surface telle qu'on la voit actuellement permettrait d'éclaircir notre vision de l'intérieur d'Europe et de son potentiel astrobiologique (Dalton et al., 2005). L'influence de la présence d'un océan en subsurface sur la possibilité de l'existence de la vie sur Europe a été fortement étudié par Chyba et al. (1998), Kargel et al. (2000), Gaidos et al. (1999)

et Abyzov et al. (2001). Le dioxyde de soufre a été détecté sur Ganymède et sur Callisto mais n'a pas été observé sur Europe. En revanche, l'acide sulfurique et le peroxyde d'hydrogène ont tous les deux été signalés sur les spectres infrarouges d'Europe, (Carlson et al., 1999b,a), et leur répartition spatiale a été étudiée (Carlson, 2001). La glace d'eau amorphe a été identifiée grâce aux observations de NIMS, (Hansen et McCord, 2004), ainsi que le dioxyde de carbone (Smythe et al., 1998; Carlson, 2001). La nature physique du CO_2 sur les lunes de glace est encore discutée. La position de la bande d'absorption à 4,25 μm dépend de l'état physique et de l'environnement du matériau. Ainsi, des spectres infrarouges en laboratoire ont été réalisés sur le CO_2 solide pur, sous forme de givre, ou encore sur des mélanges dans lesquels le dioxyde de carbone solide serait piégé dans une matrice (Farrell et Newnham, 1967; Wood et Nassau, 1967; Fink et Sill, 1982; Salisbury et al., 1991; McCord et al., 1998b). Ce matériau hôte, qui forme la matrice, pourrait être constitué de minéraux, de composants organiques, de glace d'eau (Dalton et al., 2005), ou encore, de clathrates (Prieto-Ballesteros et al., 2005). Les sels hydratés, comme l'epsomite ($MgSO_4 7H_2O$), ont des signatures spectrales similaires aux spectres naturels d'Europe, et leur capacité calorifique spécifique (c_p) suit la même évolution en fonction de la température que la glace Ih (Prieto-Ballesteros et al., 2005). En revanche, leurs conductivités thermiques (étudiées sur deux sels et un carbonate : $MgSO_4 7H_2O$, $Na_2SO_4 7H_2O$ et $Na_2CO_3 10H_2O$) montrent une évolution différente de celle de la glace Ih en fonction de la température (Prieto-Ballesteros et al., 2005). Par ailleurs, les clathrates et la glace amorphe, qui présentent la même évolution de la conductivité thermique que les sels, (Ross et Kargel, 1998), peuvent également être présent dans la croûte de glace d'Europe (Prieto-Ballesteros et al., 2004a,b). De plus, la rhéologie à l'état solide des clathrates, des sels hydratés et de la glace d'eau ont été étudiées (Stern et al., 1996; Durham et Stern, 2001; Durham et al., 1998, 2003a,b). Les

résultats sur la conductivité thermique et la rhéologie des différents matériaux laissent penser que leur influence sur l'évolution géologique de la croûte de glace sera différente (Prieto-Ballesteros et Kargel, 2005). Les clathrates pourraient se rassembler dans une chambre cryomagmatique enrichie en gaz, à leur déstabilisation, du liquide pourrait être expulsé provoquant ainsi une expansion de la croûte (Prieto-Ballesteros et Kargel, 2006). Prieto-Ballesteros et al. (2005) montrent que les clathrates de CO_2 sont stables dans la croûte d'Europe.

I.2.5 Japet, Hypérion et Phoebe : trois satellites saturniens

Le nombre exact de satellites de glace en orbite autour de Saturne est difficile à déterminer. Parmi eux, seront évoqués dans cette partie, Japet, Hypérion et Phoebe.

Japet

Japet est un satellite de glace assez sphérique de 1470 km de diamètre (Thomas et al., 2007a) dont une particularité est de présenter une ride équatoriale sur plus de la moitié de sa circonférence de plus de 20 km du haut (Porco et al., 2005). La surface du Japet est également partagée par une dichotomie d'albédo. Le constituant principal de la surface de Japet est la glace d'eau cependant les données VIMS ont permis d'identifier du dioxyde de carbone et des liaisons organiques (C-H et peut être C-N) à sa surface (Cruikshank et al., 2008). Le dioxyde de carbone a été détecté grâce à la bande à 4,27 μm. La forme et le centre de cette bande indiquent que les molécules de CO_2 sont complexées à d'autres composants de la surface comme de l'eau ou des minéraux (Clark et al., 2009; Cruikshank et al., 2010). La complexion peut être sous la forme des structures clathrates dans lesquelles le dioxyde de carbone est piégé dans les cages d'eau ou

sous la forme d'une chimisorption entre les molécules de CO_2 et des grains de minéraux ou de composants carbonatés (Hibbitts et Szanyi, 2007). Des traces de fer métallique et d'oxyde de fer ont également été détectées (Clark et al., 2009).

Hypérion

Hypérion est une petite lune de 270 km de diamètre (Thomas et al., 2007a). Sa surface est très fortement cratérisée et ressemble à une éponge (Thomas et al., 2007b). Elle paraît assez poreuse. Le constituant principal de la surface d'Hypérion est également la glace d'eau cependant les données VIMS ont aussi permis d'identifier du dioxyde de carbone et des liaisons organiques (C-H et peut être C-N) à sa surface (Cruikshank et al., 2008). L'absorption du dioxyde de carbone est décalée vers les longueurs d'onde plus courtes d'environ 0,0145 μm par rapport aux spectres de laboratoire et sa largeur est plus importante. Ces deux variations montrent que le dioxyde de carbone à la surface d'Hypérion est complexé à des composants volatils.

Phoebe

Phoebe est encore plus petite qu'Hypérion et mesure 210 km de diamètre (Porco et al., 2007). Son albédo est inférieure à ceux des autres petits corps glacés internes, ce qui suppose que Phoebe est un objet capturé (Clark et al., 2005b; Cruikshank et al., 2008). Sa surface est fortement cratérisée. Le constituant principal de la surface de Phoebe est également la glace d'eau cependant les données VIMS ont aussi permis d'identifier du dioxyde de carbone et des liaisons organiques (C-H et peut être C-N) à sa surface (Clark et al., 2005b; Buratti et al., 2008; Coradini et al., 2008). D'autres bandes d'absorption ont été assimilées à la présence de fer lié à des minéraux, à des constituants organiques solides, à des phyllosilicates et à d'autres composants non iden-

tifiés (Clark et al., 2005b; Coradini et al., 2008). La bande d'absorption du dioxyde de carbone a été détectée à 4,27 μm. Cette position indique que le CO_2 n'est pas de la glace pure mais une structure clathrate de type 2 d'après Blake et al. (1991).

La première partie de ce chapitre a d'abord permis de décrire les missions Cassini-Huygens et Galileo, respectivement envoyées vers les systèmes saturnien et galiléen. L'histoire de chacune de ces missions a été décrite succinctement. Les instruments embarqués dans ces deux missions ont été énumérés et les objectifs des missions exposés. Ensuite, le spectro-imageur de chacune des missions et leur objectifs respectifs ont été présentés. Enfin, la première section se termine sur la présentation des différents constituants glacés d'intérêt planétologique pour cette étude, *i.e.* les glaces d'eau et de dioxyde de carbone, le mélange de ces composants purs et la formation de clathrates de dioxyde de carbone. La deuxième partie de ce chapitre a été consacrée à la présentation de chacune des lunes de glace qui fait l'objet de l'application planétologique de ce travail. La morphologie de chacune des lunes (Encelade, Callisto, Ganymède et Europe) est décrite avant d'exposer les connaissances actuelles de la composition de leur surface. Trois petits satellites de saturne (Japet, Hypérion et Phoebe) sont également birèvement décrit. L'ensemble des développements expérimentaux effectués dans le but d'acquérir des spectres infrarouges de glaces à différentes tailles de grains et températures sont maintenant présentés.

Chapitre II

Méthodologie : Expériences cryogéniques et spectroscopie infrarouge des glaces

La spectroscopie infrarouge est une technique d'analyse très utilisée dans les missions spatiales. Elle permet l'observation des surfaces et la détermination de leur composition à condition qu'il existe des spectres de référence. Un objectif important de ce travail est ainsi de fournir des spectres de laboratoire, réalisés sur des échantillons de composition connue et maîtrisée dont la température et la taille de grains sont contraintes au mieux dans les conditions particulières des surfaces planétaires. Les spectres obtenus par spectroscopie infrarouge sont ensuite traités par différentes méthodes. Ce chapitre s'articule en trois sections, la première est la présentation du matériel et des techniques expérimentales utilisés pour l'acquisition des données. La seconde section est un rappel succinct sur la théorie de la spectroscopie infrarouge suivi d'une description du spectromètre du laboratoire. La dernière section, quant à elle, détaille les différentes méthodes

de traitement utilisées afin de déterminer des lois reliant des paramètres spectraux aux propriétés physiques et chimiques des glaces.

II.1 Matériel et technique

La première section de ce chapitre présente le cryostat à azote liquide, l'appareil qui a permis de réaliser la totalité des points expérimentaux de cette étude. D'abord, la première partie traite de la description de l'appareillage et des développements expérimentaux adaptés au cryostat pour étudier des échantillons aux échelles microscopique et macroscopique. Ensuite, la seconde partie expose les techniques de contrôle de température et de taille de grains au sein des échantillons.

II.1.1 Le cryostat à azote liquide

Le cryostat à azote liquide est un appareil qui a été pleinement exploité au cours de cette étude. Les développements expérimentaux ont été conçus et élaborés au sein du laboratoire en collaboration avec E. Le Menn, ingénieur d'étude au LPGN.

Description de l'appareil

Le cryostat à azote liquide, MicrostatN, de Oxford Instrument est un appareil qui permet de réaliser des études sur une gamme de température allant de 76 à 400 K sous vide primaire (10^{-5} bar). Le cryostat se divise en deux parties, le corps et le couvercle. Le corps du cryostat est constitué de différentes entrées et sorties par lesquelles la pression et la température à l'intérieur sont contrôlées. Dans le corps, un circuit en cuivre lié aux entrée et sortie d'azote et un four permettent de contraindre la température. Une

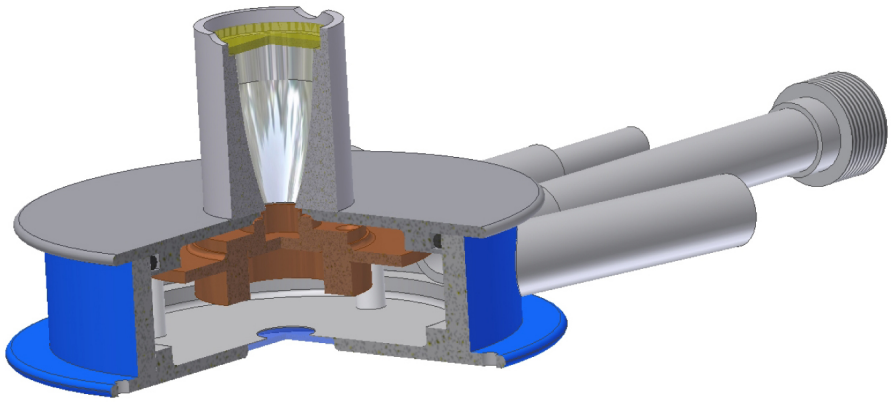


FIGURE II.1 – Schéma du cryostat à azote liquide avec la coupelle en cuivre et le couvercle conçu pour les analyses d'échantillons macroscopiques.

sortie est reliée à une pompe à vide (Pascal 2005 SD, Alcatel vacuum technology) qui assure le vide jusqu'au centième de millibar. La pompe à vide est reliée à un piège à huile et autres volatils (BOC EDWARDS, FL20K FORELINE TRAP) pour limiter d'éventuelles contaminations au sein de l'échantillon. Une jauge de pression Pirani (VSP521, Thyracont) est installée sur ce montage pour mesurer le vide dans le cryostat et fournit une mesure de pression entre 10^{-2} et 20 mbar dont l'erreur est de $\pm$ 10%. A l'intérieur du circuit en cuivre, un emplacement est prévu pour le porte-échantillon. La figure II.1 est un schéma du cryostat Oxford avec la coupelle en cuivre et le couvercle créé pour les analyses d'échantillons macroscopiques.

Echantillons macroscopiques

Les développements expérimentaux présentés dans cette partie ont été élaborés pour l'étude des échantillons à l'échelle macroscopique, soit la glace d'eau pure et les clathrates de dioxyde de carbone. Ces échantillons sont chargés dans un porte-échantillon en forme de coupelle en cuivre, (figure II.1).

Dans un premier temps, le couvercle du cryostat a dû être modifié pour améliorer la

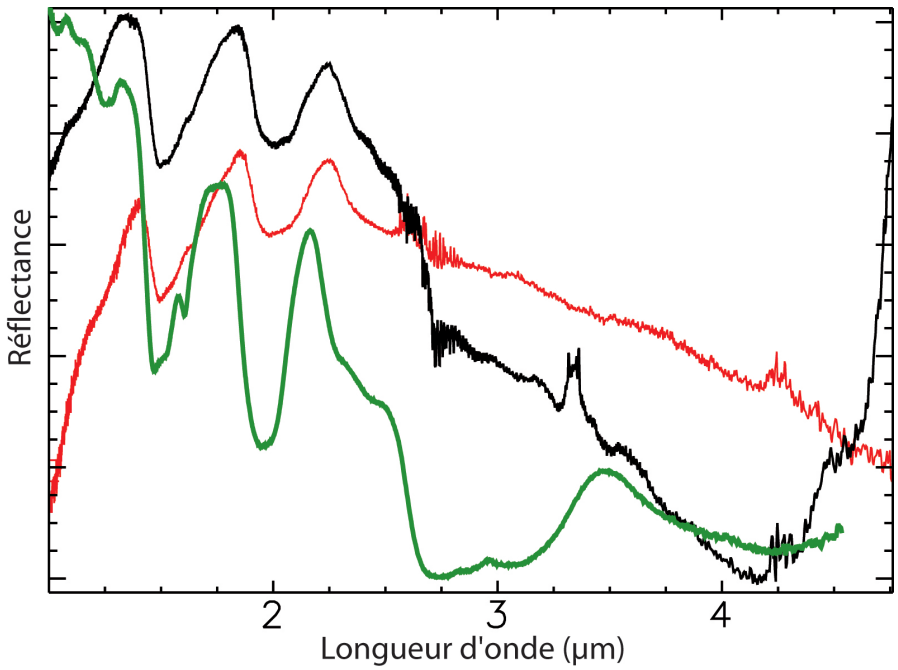


FIGURE II.2 – Les améliorations des spectres de glace d'eau au laboratoire. En rouge, spectre de givre d'eau sans le nouveau couvercle avec un backgroung d'or lisse sans fenêtre saphir (ancienne référence, voir section II.2.3). En noir, spectre de givre d'eau avec une fenêtre saphir et un background d'or lisse. En vert, spectre de givre d'eau avec le nouveau couvercle du cryostat et une référence d'or rugueuse, (voir section II.2.3)

qualité des spectres. Le couvercle d'origine est plat avec une fenêtre saphir. Il est placé sous le miroir parabolique du spectromètre, dans l'emplacement prévu à cet effet. Malheureusement, dans cette configuration, les spectres étaient de moindre qualité. Aussi, un autre couvercle a été conçu par E. Le Menn pour l'analyse des échantillons macroscopiques. Ce couvercle possède également une fenêtre saphir mais elle est située au dessus d'un miroir parabolique collé au couvercle, (figure II.1). La qualité des spectres a été nettement améliorée grâce à cette innovation (figure II.2).

Dans un second temps, des pollutions (atmosphériques) ont été remarquées sur les échantillons glacés, synthétisés à l'air libre, au dessus d'un bain d'azote liquide. Ainsi, pour fabriquer des échantillons non pollués, une enceinte triangulaire, ou boîte à gants,

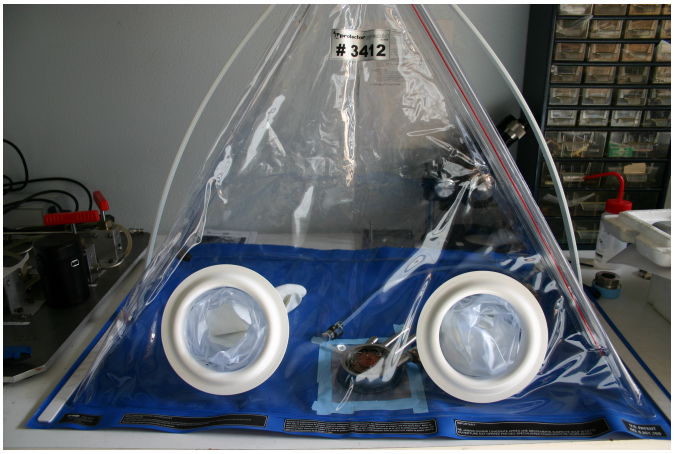


FIGURE II.3 – Photographie du cryostat à azote liquide dans la boîte à gants.

a été achetée. Son utilisation assure une atmosphère de travail contrôlée. La figure II.3 est une photographie du cryostat à azote liquide dans l'enceinte triangulaire. Les résultats obtenus avec l'enceinte triangulaire sont bons. Cependant, cette technique de synthèse n'est pas pratique et le plastique de l'enceinte est très sensible au froid. Un investissement plus conséquent a été effectué de manière à synthétiser des grains de glace plus facilement : une chambre froide. Celle-ci permet de travailler sur les échantillons dans une atmosphère plus froide, et moins humide. La température de travail est comprise entre $-25°$C et l'ambiante. Les échantillons glacés à l'échelle macroscopique sont broyés et tamisés dans la chambre froide de manière à contraindre la taille de grains. Le chargement des échantillons se réalise dans la chambre froide entre -15 et -20°C, ainsi la pollution des échantillons par condensation d'eau atmosphérique est limitée. Le chargement en chambre froide est essentiel même pour les échantillons de glace d'eau pure. En effet, la condensation d'eau atmosphérique nuit à la qualité du contrôle de la taille de grains. Par ailleurs, une pesée des échantillons a été réalisée de manière à calculer le taux de compaction des échantillons. Ce paramètre intervient dans le calcul des spectres théoriques.

Finalement, un microscope binoculaire, surmonté d'une caméra, a été installé dans la chambre froide. Cet appareil permet de réaliser des photographies (présentées ultérieurement) des grains issus du même tamisage que les échantillons étudiés. Ces photographies ont pour but de permettre une étude statistique des tailles de grains (voir section II.1.2). Cette caméra acquière des photographies de 1600×1200 pixels^2 et chaque pixel mesure 2,8 μm.

Echantillons microscopiques

Les développements expérimentaux décrits dans cette partie ont été élaborés pour l'étude des échantillons à l'échelle microscopique, soit la glace de dioxyde de carbone pure et les mélanges linéaires des glaces d'eau et de CO_2.

La signature spectrale du dioxyde de carbone pure est difficile à obtenir. En effet, la condensation de quelques molécules d'eau en surface se reconnaît facilement à la très forte signature de la glace Ih. Ainsi, après de multiples essais de chargement non satisfaisants dans l'enceinte triangulaire et la chambre froide, un nouveau dispositif expérimental a été élaboré. E. Le Menn a conçu et dessiné une cellule qui s'adapte au cryostat à azote liquide et qui sépare l'atmosphère du cryostat, sous vide, et celui de la cellule, remplie de gaz de CO_2 pour notre application. La cellule à atmosphère contrôlée est constituée d'une enceinte en cuivre de 15,5 mm de diamètre et 2,5 mm de hauteur, fermée par une fenêtre saphir de 15 mm de diamètre et 1 mm d'épaisseur. L'ouverture apparente est de 10 mm de diamètre. La cellule est reliée par un capillaire à une pompe à vide qui permet de purger l'air au début de l'expérience et à une bouteille de dioxyde de carbone (N45) de Air liquide. Un tube en polyuréthane est entre le capillaire et la pompe à vide alors qu'un tube en Téflon© est installé entre le capillaire et la bouteille de gaz, de manière à limiter les pollutions issues d'éventuelles interactions entre le polyuré-

thane et le CO_2. La fenêtre en saphir adhère au couvercle grâce à une colle au silicone, des pollutions ont été identifiées comme étant proche de cette signature spectrale. La figure II.4 présente le schéma de la cellule.

L'étude de mélanges linéaires s'est réalisée en deux temps. D'abord, des tests préliminaires ont été réalisés en analysant le dépôt séquentiel de grains de glace d'eau pure (condensation de vapeur d'eau sur une plaque de cuivre froide dans le cryostat) et de grains de glace de dioxyde de carbone (condensation de gaz de CO_2 sur les grains de glace d'eau). Ensuite, une étude plus complète a été effectuée avec la nouvelle cellule. Des grains de glace d'eau pure ont été broyés et tamisés au dessus de la nouvelle cellule dans la chambre froide. Le dioxyde de carbone gazeux est ensuite introduit par le capillaire, selon le même protocole que pour l'étude de la glace de dioxyde de carbone pure. L'acquisition de spectres est alors réalisée sous un microscope relié au spectromètre infrarouge, le couvercle du cryostat est alors plat mais légèrement surélevé pour permettre la présence de la cellule dans le cryostat sans provoquer de pont thermique. Ce couvercle a également été conçu pour s'adapter à l'utilisation de la nouvelle cellule. Le microscope relié au spectromètre est également équipé d'une caméra qui permet l'acquisition de photographies et, par conséquent, la mesure des grains des échantillons microscopiques. Cette caméra acquière des photographies de 1024×768 pixels^2 et chaque pixel mesure 0,6 μm.

Grâce à ces développements expérimentaux, des signatures spectrales de glaces d'eau et de CO_2 pures, ainsi que des mélanges de ces glaces et des clathrates de CO_2, ont pu être acquises en minimisant d'éventuelles traces de pollution.

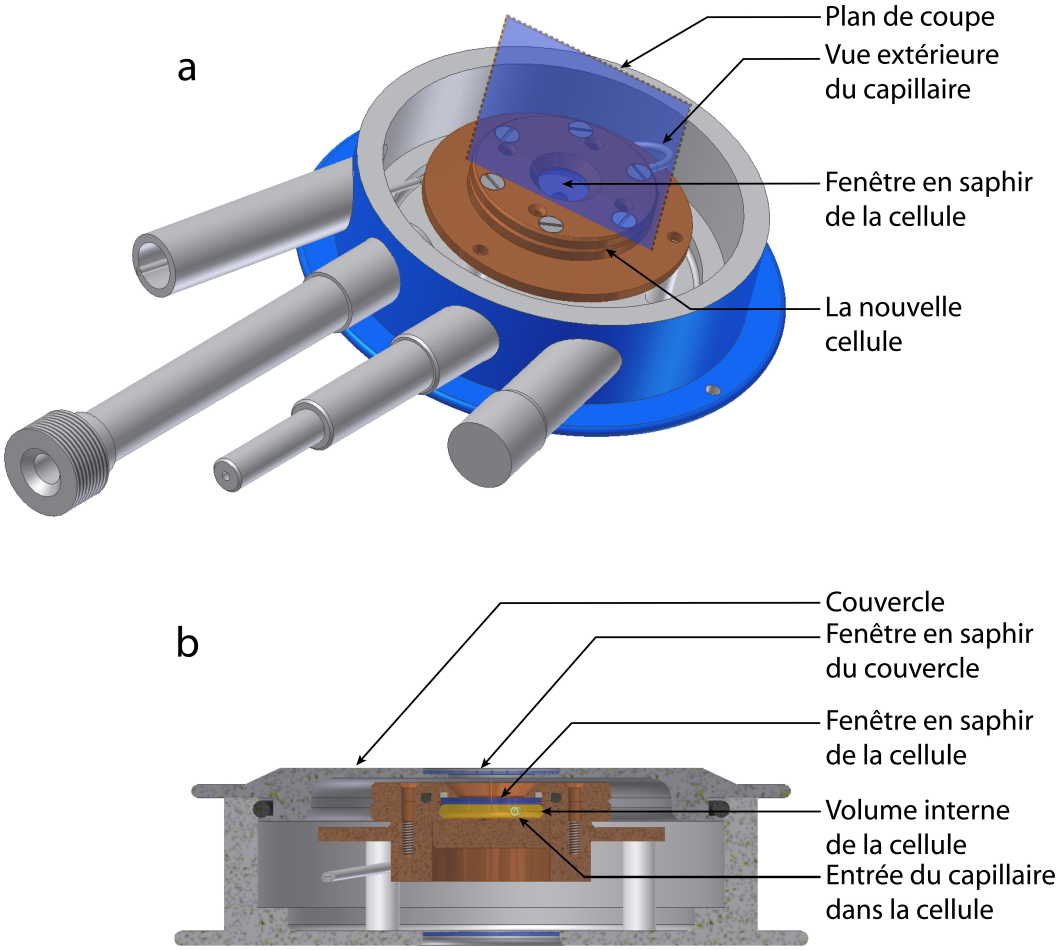


FIGURE II.4 – Cellule à atmosphère contrôlée conçue pour l'étude de la glace de dioxyde de carbone pure. La cellule est séparée de l'atmosphère du cryostat et reliée à l'entrée du dioxyde de carbone par un capillaire.

II.1.2 Contrôle de la température et de la taille de grain

Le cryostat à azote liquide permet une mesure et un contrôle facile de la température de l'échantillon. En revanche, le contrôle de la taille de grains a nécessité un protocole expérimental précis et une étude plus approfondie.

Boîtier de contrôle de température

Un contrôleur de température ITC-601 d'Oxford Instruments régule la température du cryostat. L'ITC-601 relève la température du thermomètre, une résistance en platine PT100 de classe A, situé à l'intérieur du cryostat, au plus près de l'échantillon. Le contrôleur réagit à cette information en fonction des choix configurés par l'utilisateur. L'appareil adapte sa réponse thermique (un petit four est placé sous le système de cuivre dans le cryostat) au débit d'azote. Le refroidissement par azote est géré par pompage indépendamment du contrôleur. L'entrée d'azote est directement reliée à un vase de Dewar dont le débit est assuré par une aspiration au niveau de la sortie. La bonne conductivité thermique du cuivre employé pour ces deux parties permet une réponse rapide en température de l'échantillon.

Tamisage des grains de glace

Les échantillons sont synthétisés dans la chambre froide par solidification d'eau à chromatographie de Merck Chemicals. Le glaçon ainsi formé est broyé à l'aide de deux jeux de mortiers et pilons, l'un en céramique permettant de réaliser les tamissages grossiers, l'autre en agate pour les broyages plus fins. Les petits grains de glace sont ensuite tamisés afin de contraindre leur granulométrie. L'utilisation de deux tamis permet d'obtenir différentes populations de taille contraintes par les tailles des tamis. Sept intervalles

de taille de grains (en μm) ont été selectionnés : 63-100,100-180,160-180,180-250, 250-350, 350-500 et 500-710. L'ensemble des tamis disponibles et leurs caractéristiques sont données dans le tableau ci-dessous. Toutes les populations analysées ont été triées entre deux tamis de la liste présentée ci-dessous. Des pinceaux ont été utilisés pour séparer les grains à même la grille du tamis, les petites granulométries ayant tendance à former des populations s'agglomérant facilement.

TABLE II.1 – Tailles et références des tamis

Tamis (côté de la maille, μm)	Armature	Toile
63	Acier inoxydable	Acier inoxydable
100	Laiton recouvert [a]	Bronze
160	Laiton recouvert [a]	Laiton
180	Acier inoxydable	Acier inoxydable
250	Acier inoxydable	Acier inoxydable
350	Laiton recouvert [a]	Donnée inconnue
500	Acier inoxydable	Acier inoxydable
710	Acier inoxydable	Acier inoxydable

a. Couverture en chrome ou nickel probable

Les populations ont été réalisées au cours des expériences sur la glace d'eau pure. Les grains constituant les populations sont issus du même tamisage que les grains des échantillons analysés au spectromètre infrarouge. Les différentes populations ont été étudiées statistiquement, dans le paragraphe suivant, pour évaluer la moyenne et la répartition des tailles de grains au sein d'un échantillon.

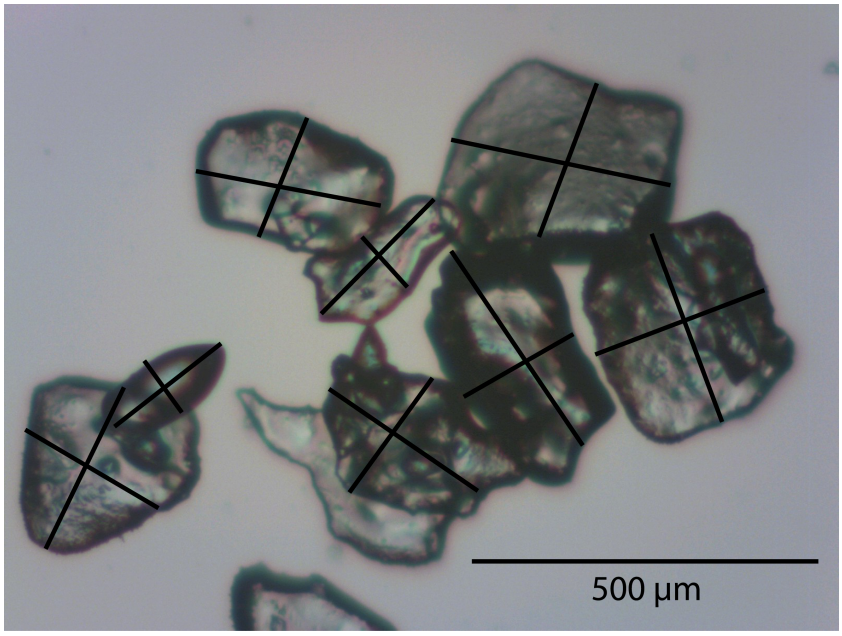


FIGURE II.5 – Photographie en transmission de grains de glace d'eau tamisés entre 180 et 354 μm acquise sous un microscope binoculaire dans la chambre froide. Les traits représentent les mesures effectuées sur les grains pour l'étude statistique.

Etude statistique sur les grains

Des photographies des échantillons, dont la taille de grains a été contrainte par tamisage comme indiqué dans le paragraphe précédent, ont été acquises dans la chambre froide. Ces photographies permettent de faire une étude statistique de la taille de grains des échantillons tamisés et d'améliorer la précision de la contrainte. La figure II.5 est une photographie en transmission de grains de glace d'eau qui ont été tamisés entre 180 et 354 μm.

Au total, 218 photographies d'échantillons d'eau pure ont été acquises et 1489 mesures de taille de grains de glace d'eau ont été relevées pour faire une étude statistique sur la distribution de la taille de grains dans les échantillons. Chaque grain a été mesuré dans sa longueur et sa largeur. La figure II.6 montre les graphiques de distribution des

tailles de grains mesurées. Chaque graphique présente un histogramme du nombre de mesures en fonction d'un centre de classe. Les traits pourpres verticaux représentent la limite de taille des tamis. Les traits verticaux en tirés bordeaux situent la moyenne des tailles de grains mesurées et les pointillés verts, l'écart-type sur l'ensemble de la population. Les courbes noires représentent une approximation normale de la distribution. Les différentes distributions montrent des répartitions aléatoires de tailles de grains centrées autour d'une valeur moyenne. Ces mesures se situent en majorité entre les bornes imposées par les dimensions des tamis. Cependant, des grains plus petits que la borne inférieure des tamis ont pu se coller à des grains plus gros et ainsi, rester parmi les grains à analyser et des grains plus longs (ex : en forme de parallélépipède rectangle dont la hauteur serait supérieure aux bornes et les largeur et longueur, inférieures) que la borne supérieure des tamis ont pu passer verticalement, le long de la hauteur. Ainsi, quelques grains dont la taille pourrait être en dehors des bornes, se retrouvent parmi les grains de l'échantillon. Le tamisage reste cependant une excellente méthode pour contraindre les tailles de grain. La comparaison à une loi normale est une façon qualitative directe pour estimer la pertinence de l'utilisation de la valeur moyenne. La valeur moyenne semble un bon compromis pour caractériser les différentes populations. La moyenne arithmétique de chaque population sera une approche acceptable aux dimensions des grains concernés.

Cette section a décrit le cryostat à azote liquide utilisé pour l'ensemble des échantillons et a exposé les techniques de mesure et de contrôle de la température et de la taille de grains. La section suivante est un rappel des notions de base de la spectroscopie infrarouge et une présentation du spectromètre infrarouge à transformée de Fourier utilisé au laboratoire.

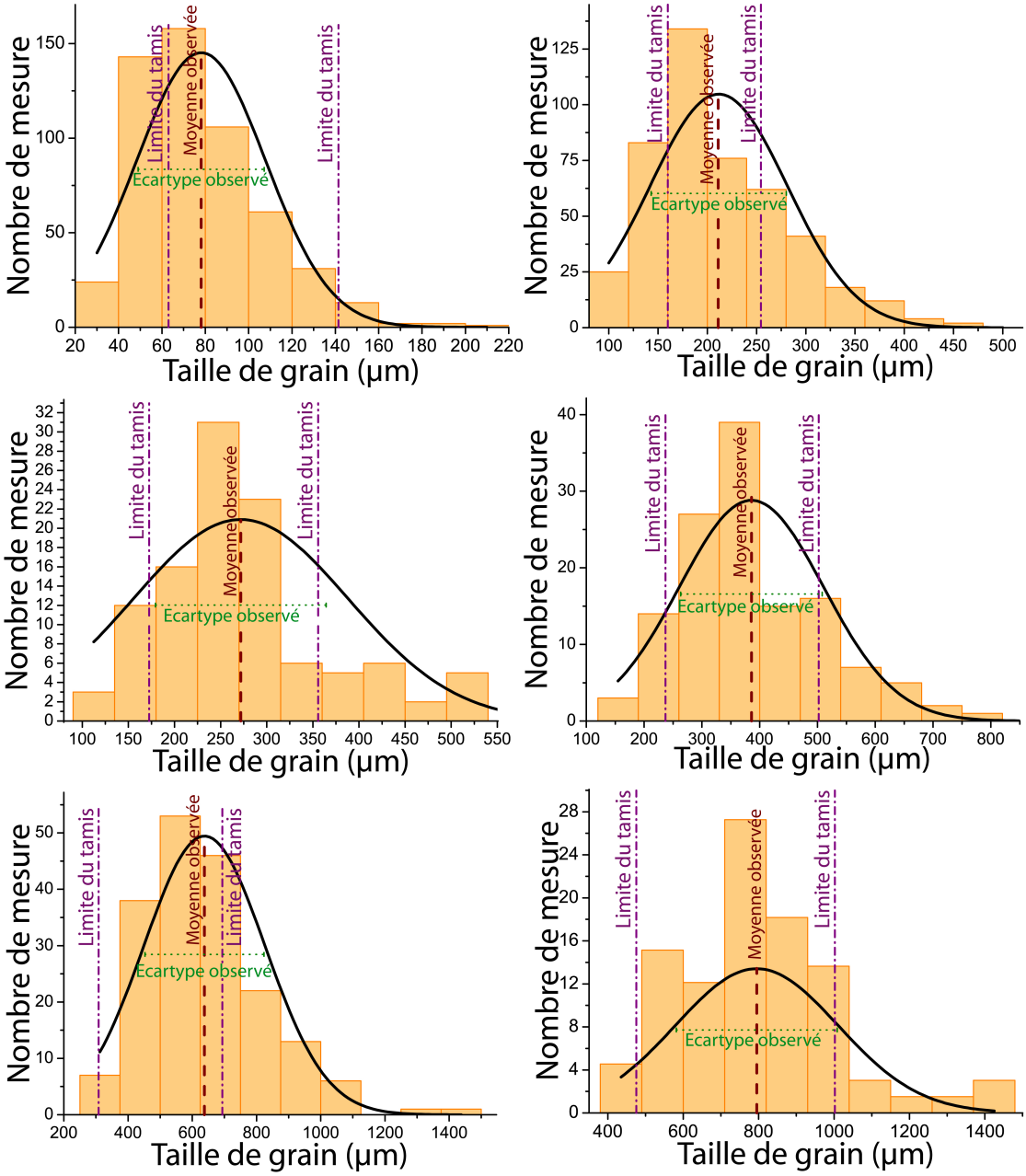


FIGURE II.6 – Graphiques de la distribution de tailles de grains des échantillons d'eau à l'échelle macroscopique.

II.2 La spectroscopie infrarouge

La spectroscopie infrarouge est un outil d'analyse non destructif qui permet l'obtention d'informations sur la matière à partir de son interaction avec un rayonnement. Cette analyse peut être qualitative : un composé est identifié à partir de sa signature spectrale, ou quantitative : le dosage d'une substance est possible grâce à sa signature spectrale. Cette section se découpe en trois parties. D'abord, quelques rappels de base sont évoqués. Ensuite, le spectromètre infrarouge à transformée de Fourier du laboratoire est présenté. Enfin, une discussion sur le lien existant entre l'observation naturelle et les expériences réalisées en laboratoire est proposée.

II.2.1 Rappel sur le principe physique

La découverte de la région du proche infrarouge peut être attribuée à William Herschel pour son travail présenté en avril 1800 « *Experiments on the Refrangibility of the invisible Rays of the sun* ». Toutefois, il fallut attendre 1881 pour que Abney et Festing enregistrent les spectres de plusieurs liquides organiques puis 1905 pour que William W. Coblentz obtienne les spectres infrarouge de 19 substances et postule que ces bandes appartiennent à une série harmonique. De plus, ce n'est qu'avec l'apparition des spectromètres infrarouges à transformée de Fourier, au début des années 1970, que la spectrométrie infrarouge devint une technique de caractérisation usuelle (aisée à mettre en oeuvre). La spectroscopie proche infrarouge est une spectroscopie d'absorption dont le principe repose sur l'absorption du rayonnement proche infrarouge par la matière. La méthode s'intéresse au nombre de liaisons chimiques spécifiques du constituant : O-H, N-H, C-H, etc. Les liaisons chimiques se comportent comme des oscillateurs qui vibrent en permanence à des fréquences différentes en fonction de leur nature. Une liaison chi-

mique particulière peut absorber une radiation proche infrarouge dont la fréquence est égale à sa fréquence de vibration et ainsi passer d'un état fondamental à un état excité. Dans la zone du proche infrarouge, les absorptions ne sont pas dues aux vibrations fondamentales des molécules, mais aux vibrations harmoniques et aux vibrations de combinaisons. De plus, l'absorption du rayonnement infrarouge ne peut avoir lieu que si le mouvement de vibration du mode considéré induit une variation du moment dipolaire électrique de la molécule.

Modes de vibration

Pour l'absorption infrarouge, les transitions énergétiques se font entre les niveaux d'énergie de rotation des molécules ou entre leurs niveaux d'énergie de vibration. Les transitions vibrationnelles nécessitent plus d'énergie que les transitions rotationnelles. Aussi la lumière excitatrice provoquera-t-elle, pour chaque transition vibrationnelle, une multitude de transitions rotationnelles, qui vont donner au pic de transition vibrationnelle l'allure d'une bande d'absorption. Les fréquences de vibration dépendent des masses des atomes et des forces de liaison. L'usage classe les vibrations moléculaires en deux groupes : les vibrations de valence ou d'élongation (symétriques ou antisymétriques) et les modes de déformation. Les vibrations d'élongation font intervenir une(des) variation(s) de(s) longueur(s) de liaison(s) et les angles que forment ces liaisons restent constants. Au contraire, pour les modes de déformation, les liaisons gardent leur longueur, mais les angles qu'elles forment varient. Une molécule formée de N atomes possède 3N degrés de liberté. Parmi eux, trois représentent la translation de la molécule dans son ensemble (le long des trois axes du repère x, y, z) et trois autres définissent la rotation de la molécule autour de chacun de ces axes. Les mouvements internes de vibration de la molécule seront déterminés par les $3N-6$ coordonnées

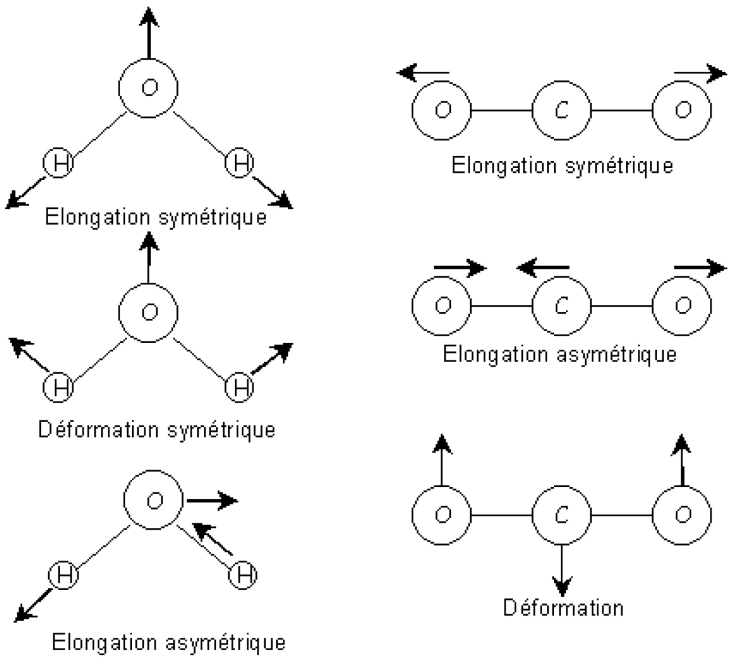


FIGURE II.7 – Modes de vibration d'élongation et de déformation des molécules d'eau et de dioxyde de carbone

restantes (3N−5 si la molécule est linéaire). Par exemple, prenons une molécule à 3 atomes non linéaire. D'après la formule précédente, 3N-6 = 9-6 = 3 degrés de liberté de vibration sont à considérer :

- 1 vibration de valence symétrique (stretching)
- 1 vibration de valence asymétrique (stretching)
- 1 vibration de déformation dans le plan (bending)

La figure II.7 indique les différents modes de vibration des molécules d'eau et de dioxyde de carbone. D'autres transitions peuvent être à l'origine de bandes d'absorption comme la transition électronique. La relaxation électronique suite à une excitation fait passer un électron d'un état excité (E_E) à un état fondamental (E_F) en émettant un rayonnement caractéristique dont la longueur d'onde ($\lambda = \frac{1}{E_E - E_F}$) correspond à une bande d'absorption. Les bandes d'absorption issues des transitions électroniques

peuvent être déconvoluées par certains processus de calcul comme le Modèle Gaussien Modifié élaboré par Sunshine et al. (1990).

La réflectance

Cette étude utilise la spectrométrie de réflectance sur des solides dans le domaine proche infrarouge entre 1 et 5 μm ui est le domaine couvert par le spectromètre imageur de Cassini. La figure II.8 est une illustration de la répartition des différents domaines spectraux. La réflectance est le rapport entre le flux d'énergie réfléchie par une surface sur le flux d'énergie reçue par cette même surface pour une longueur d'onde donnée. La figure II.9 présente deux types de rayonnement : sur un miroir (cas de la réflexion spéculaire) et sur un diffuseur (cas de la réflexion diffuse) dans le cas de surfaces théoriques et naturelles. Le rayonnement sur un solide homogène de taille finie est diffusé par la surface de façon plus ou moins importante selon sa rugosité. Sur une surface lisse, la réflexion, dite spéculaire, est unidirectionnelle avec un angle opposé à l'angle d'incidence. Plus la surface est rugueuse, plus ses interactions avec le rayonnement sont privilégiées, plus la diffusion est prédominante. Une surface est dite lambertienne lorsque la diffusion est totale et qu'aucune direction n'est privilégiée. Les surfaces naturelles ne sont jamais parfaitement réfléchissantes ou diffusantes mais l'une ou l'autre des composantes est prépondérante.

Dans cette étude, tous les échantillons sont étudiés en réflexion diffuse.

L'observation de surfaces planétaires

La spectroscopie infrarouge permet d'obtenir des informations sur la composition des surfaces planétaires. Ainsi, l'imagerie hyperspectrale a été développée pour acquérir une image de surface planétaire dont chaque pixel est constitué d'un spectre.

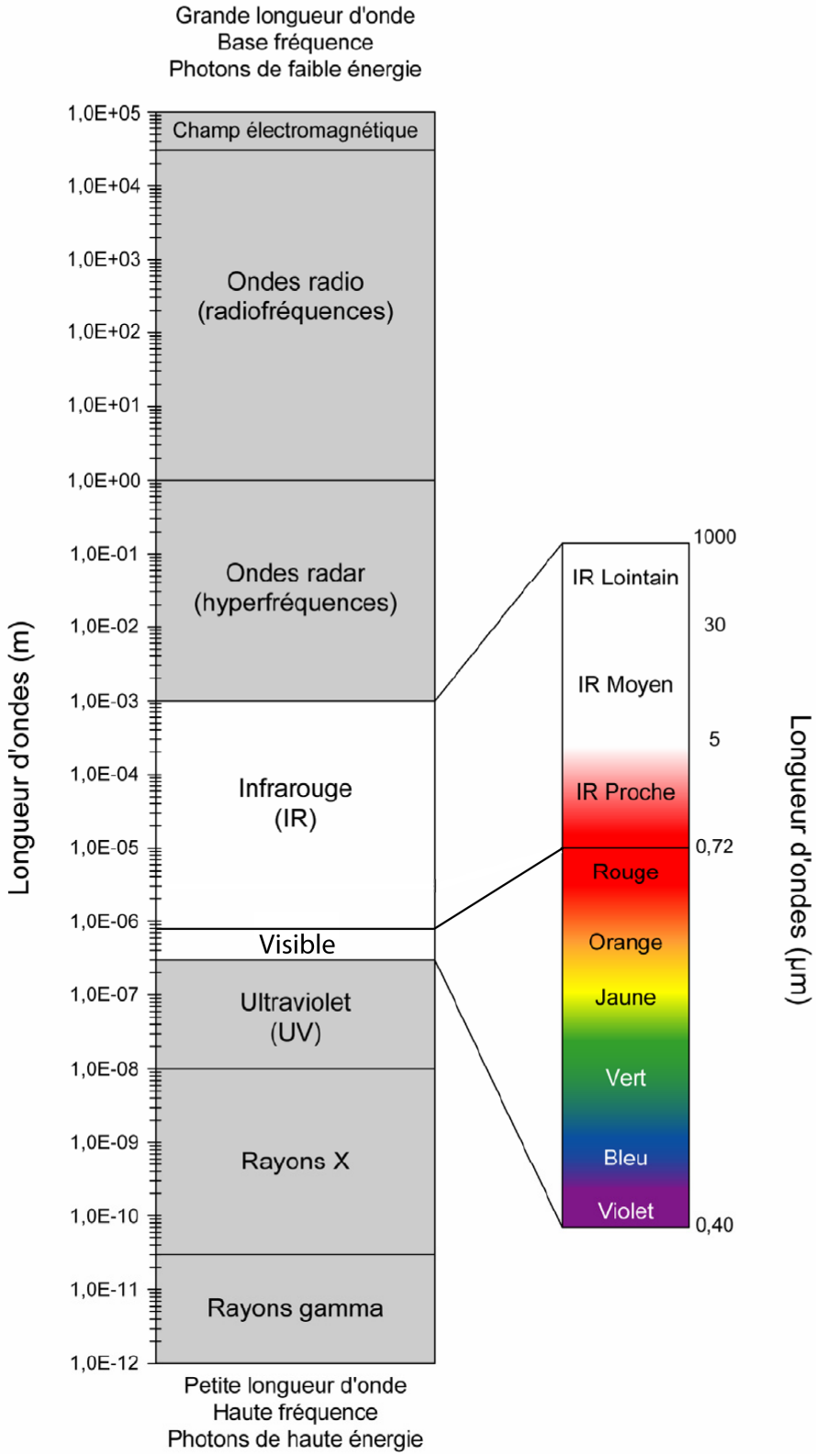


FIGURE II.8 – Schéma des différents domaines spectraux existants d'après Roy (2007). Le domaine d'étude (entre 1 et 5 μm) fait partie du proche infrarouge

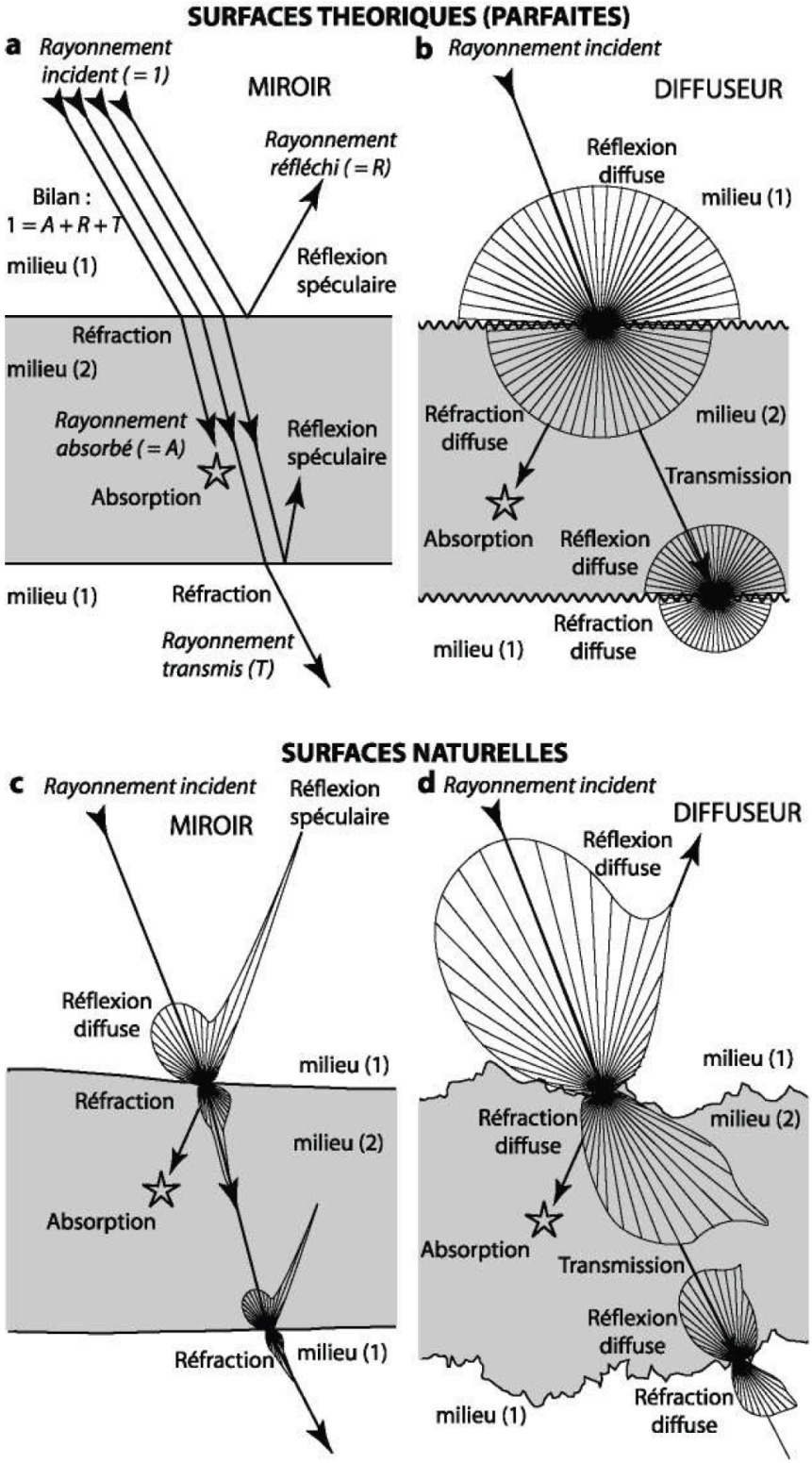


FIGURE II.9 – Schéma de l'interaction rayonnement lumière-matière (Combe, 2005). a) Interaction avec une surface théorique lisse (réflexion spéculaire), b) Interaction avec une surface théorique parfaitement diffusante (réflexion diffuse), c) Interaction avec une surface naturelle potentiellement lisse et d) Interaction avec une surface naturelle potentiellement diffusante

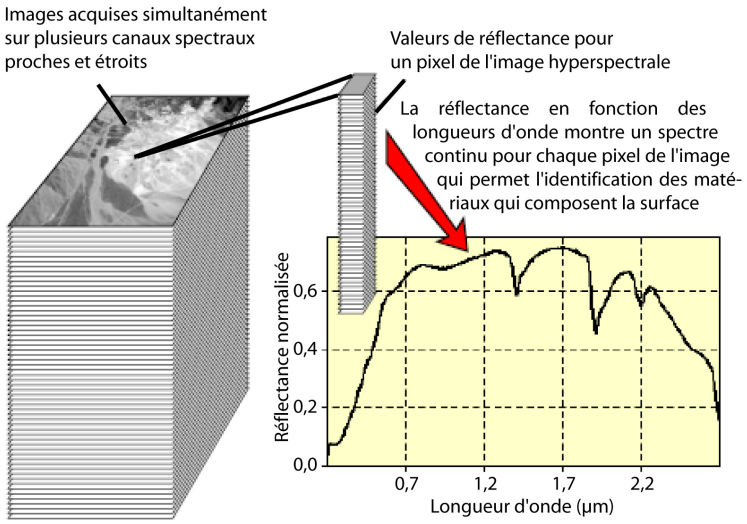


FIGURE II.10 – Schéma explicatif de la technique d'imagerie hyperspectrale.

Chaque pixel donne donc un renseignement sur la composition locale de la surface. La figure II.10 est un schéma explicatif de l'imagerie hyperspectrale. Cette technique, initialement utilisée pour les surfaces terrestres, est aujourd'hui couramment utilisée en planétologie afin de déterminer la composition des surfaces planétaires. Les données obtenues avec cette technique sont des cubes hyperspectraux. Les deux premières dimensions (x et y) donnent des informations spatiales qui permettent de projeter l'image dans un système de coordonnées. La troisième dimension (z) correspond aux valeurs de réflectance à des longueurs d'onde données.

Après ces rappels brefs du principe de la spectroscopie infrarouge et la présentation de l'imagerie hyperspectrale, le spectromètre infrarouge utilisé au laboratoire est présenté dans le paragraphe suivant.

II.2.2 Le spectromètre infrarouge à transformée de Fourier

L'appareil d'analyse utilisé pour l'étude est un spectromètre infrarouge à transformée de Fourier, le *Nicolet 5700*, associé à un microscope, *Continμum*. D'abord, cette partie décrit le fonctionnement du spectromètre et le logiciel d'acquisition. Ensuite, les configurations utilisées pour les analyses des échantillons aux échelles macroscopique et microscopique sont expliquées. Enfin, un court paragraphe présente les interrogations et les choix concernant le matériau utilisé pour la référence spectrale, *i.e.* le background.

Description technique de l'appareil et du logiciel

Chaque composant absorbe à une longueur d'onde précise. La spectrométrie permet de déterminer cette longueur d'onde de manière à caractériser chimiquement le composant. Les spectromètres classiques utilisent soit des lampes monochromatiques dont le coût est important, le nombre limité et le temps de transition entre elles long, soit à des sources polychromatiques traitées par monochromateurs, ce qui induit des problèmes de largeurs de fente et de résolution spectrale. En revanche, le spectromètre infrarouge à transformée de Fourier utilise une source polychromatique divisée en deux rayonnements par la séparatrice. Ces deux faisceaux possèdent la même gamme spectrale mais parcourent des chemins optiques différents, ce qui est à l'origine des interférences lors de la recombinaison des faisceaux. Le signal envoyé, réfléchi ou transmis répond à un interférogramme connu permettant, par transformée de Fourier, de déterminer le spectre de l'échantillon. Avec cette méthode, l'ensemble du signal lumineux envoyé sur l'échantillon à chaque instant, permet des acquisitions de courtes durées et des intensités élevées du signal sur des résolutions spectrales fines. Le spectromètre infrarouge à transformée de Fourier Nicolet 5700 (Thermofisher) analyse des échantillons sur dif-



FIGURE II.11 – Photographie du spectromètre InfraRouge à Transformée de Fourier Nicolet 5700 de Thermofisher : Banc principal au centre et microscope Continμum à droite.

férentes gammes spectrales selon la source de lumière, la séparatrice et le détecteur utilisés. La figure II.11 est une photographie du spectromètre utilisé. Le banc principal, au centre de la figure II.11, est utilisé pour l'étude des échantillons glacés à l'échelle macroscopique, tandis que le microscope, à droite sur la figure II.11, est utilisé pour les échantillons à l'échelle microscopique. Dans cette étude, la source est une source de lumière blanche dont le domaine spectral s'étend de 1 à 5 μm, la séparatrice est en difluorure de calcium CaF_2 et le détecteur en DTGS (*Deuterated TriGlycine Sulfate*). Ce spectromètre infrarouge est composé d'un interféromètre de Michelson. Ce dispositif est formé de deux miroirs plans perpendiculaires dont l'un est fixe et l'autre, mobile. Une lame semi-réfléchissante, appelée séparatrice, inclinée à 45° par rapport à la direction de propagation du rayonnement incident est placée au centre du montage. La figure II.12 représente l'intérieur du spectromètre infrarouge. Le spectromètre infrarouge s'étalonne

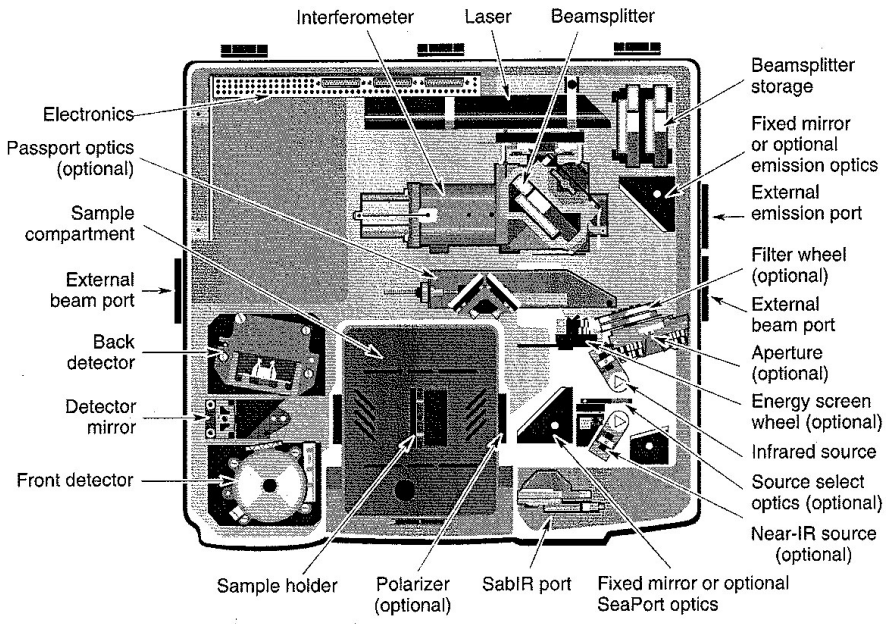


FIGURE II.12 – Schéma de principe de spectromètre infrarouge et de son interféromètre de Michelson.

(ou s'aligne) à l'aide d'un LASER He-Ne dont la longueur d'onde est $0,6328\,\mu$m. Le logiciel OMNIC 7.3 est utilisé lors de l'acquisition des spectres. Le logiciel permet de gérer l'acquisition des spectres et le fonctionnement de l'appareil. Des algorithmes de traitements (lissage, retrait de la ligne de base, opération sur des spectres ...) sont disponibles. Malheureusement, les calculs implémentés ne sont pas disponibles. Par souci de rigueur, l'ensemble des traitements a été réalisé *a posteriori* sur les spectres par des programmes écrits par nos soins dans lesquels les calculs sont évidemment connus, (voir la section II.3).

Configurations de l'appareil pour l'étude

Le logiciel OMNIC permet de programmer la configuration du spectromètre pour l'analyse. La figure II.13 est une présentation de l'interface du logiciel pour l'expérience

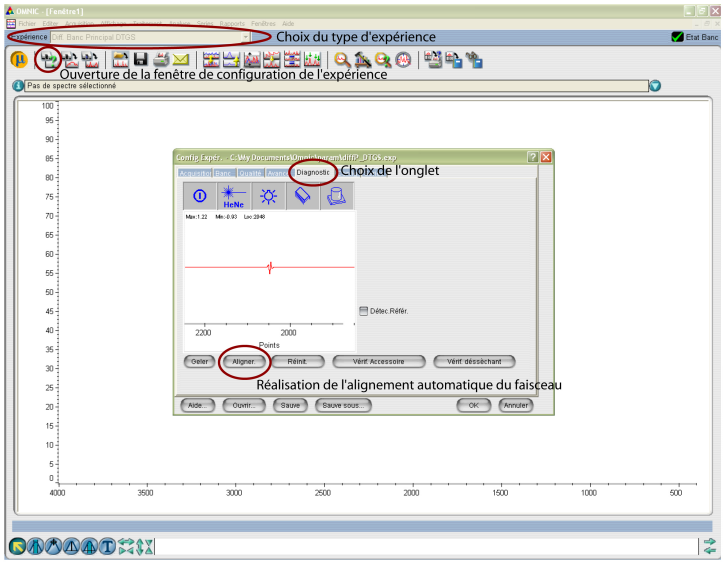


FIGURE II.13 – Présentation de l'interface du logiciel OMNIC. La fenêtre de configuration de l'expérience est ouverte à l'onglet « *diagnostic* » pour effectuer l'alignement du spectromètre.

de diffraction dans le banc principal pour le détecteur DTGS. L'onglet présenté sur la figure II.13 est ouvert pour faire l'alignement du faisceau d'analyse. L'alignement est essentiel à chaque début d'expérience, ou à chaque changement d'instrument (séparatrice, détecteur, source ...). Dès la fin de l'alignement automatique de l'appareil, l'onglet « *banc* », présenté par la figure II.14, peut être sélectionné pour vérifier l'ensemble des instruments vus par le spectromètre. Dans cet onglet, la gamme spectrale peut être modifiée, à condition de rester dans les bornes définies par les instruments (séparatrice, détecteur, source ...). D'autres paramètres sont modifiables et permettent l'amélioration de la qualité des spectres. La figure II.15 montre l'onglet « *Acquisition* » qui sert à la gestion des paramètres d'acquisition du spectre et du background. Le background est acquis une fois avant l'installation du cryostat dans le cas des échantillons macroscopiques, puis enregistré et réutilisé pour l'ensemble des spectres d'une même expérience.

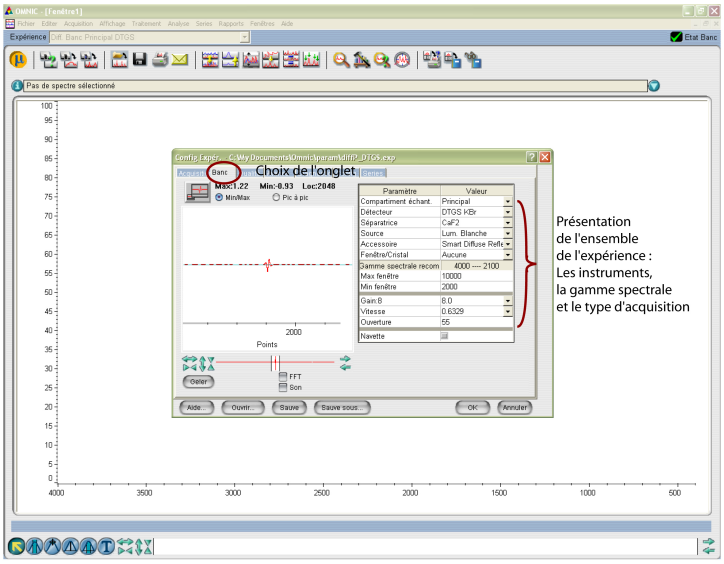


FIGURE II.14 – La fenêtre de configuration de l'expérience est ouverte à l'onglet « *banc* » pour vérifier l'ensemble des instruments (détecteur, séparatrice ...) vus par le logiciel, ainsi que la gamme spectrale d'analyse et les paramètres d'acquisition des spectres.

Au contraire, il est effectué après l'installation du cryostat pour les échantillons microscopiques dont le background est le fond de la cellule d'analyse, (voir la partie II.2.3). La fenêtre en saphir utilisée avec le cryostat est adaptée à la réflexion diffuse. Le saphir présente une absorption minimale entre 1 et 4 μm, estimée à 30% pour ses deux millimètres d'épaisseur (perte de 30% du signal à l'aller, et de 30% au retour). Les acquisitions sont effectuées sur le banc principal, en lumière blanche, à l'aide d'une séparatrice CaF_2 (fluorure de calcium, adapté aux études entre 1 et 8 μm) et d'un détecteur DTGS (*Deuterated TriGlycine Sulfate*, utilisable entre 1 et 28 μm sur le banc principal) ou InSb (Antimoine d'indium, utilisable entre 1 et 5,5 μm avec le microscope). Les analyses s'étendent sur un domaine de 1 à 5 μm, avec une résolution spectrale de l'ordre de 0,2 nm vers 1 μm, et de 5 nm vers 5 μm. L'ouverture du diaphragme utilisée est de 55 (soit une surface de 0,15 cm^2), et le gain de 8. Chaque spectre est une sommation de

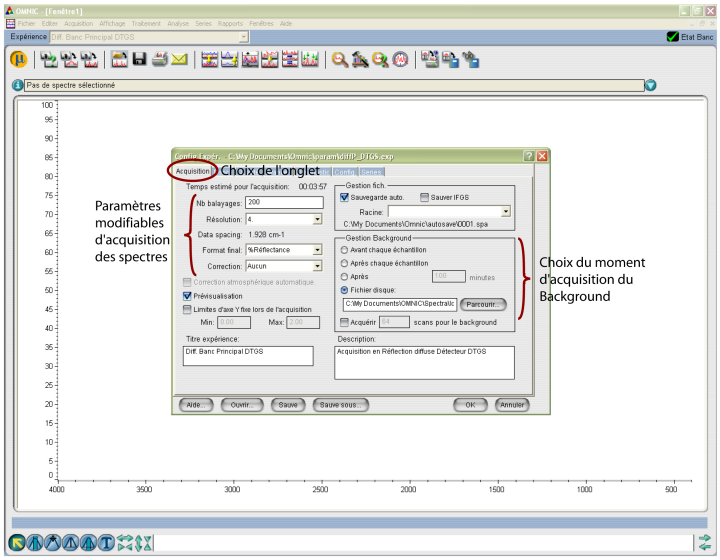


FIGURE II.15 – La fenêtre de configuration de l'expérience est ouverte à l'onglet « *Acquisition* » pour gérer les paramètres d'acquisition des spectres et du background.

200 mesures.

Cette partie a décrit le spectromètre et les différentes configurations du logiciel associé. La partie suivante discute de l'importance de la surface de référence, le background.

II.2.3 Le background

Le background est une surface de référence pour l'analyse des échantillons. Le choix du matériau pour l'acquisition du background est capital dans l'obtention des spectres. Plusieurs semaines de développement ont été nécessaires pour améliorer le background en fonction de l'expérience.

Echantillons à l'échelle macroscopique

Usuellement, les spectroscopistes prennent une surface d'or lisse pour background. En effet, l'or est un matériau adapté à l'acquisition d'un bruit de fond dans le proche

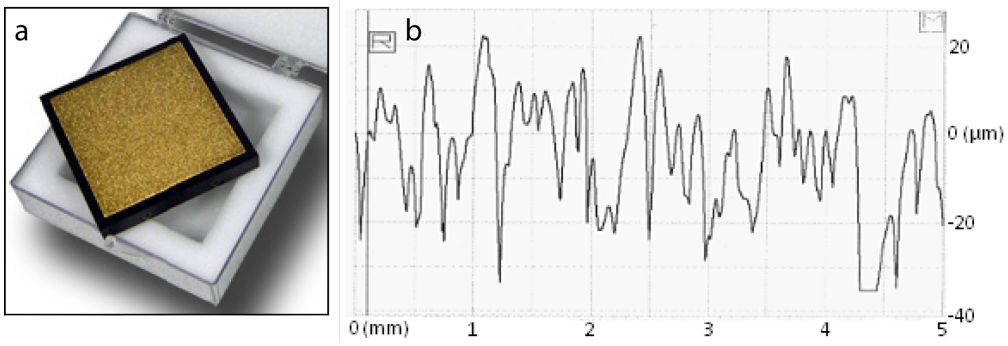


FIGURE II.16 – a) Image de l'Infragold©, or rugueux qui permet d'acquérir un background adapté aux échantillons de l'étude. b) Profil microtopographique réalisé à l'Institut des Matériaux Jean Rouxel à Nantes (IMN). Ce profil, réalisé sur une longueur de cinq millimètres, illustre la rugosité du matériau. La granulométrie moyenne est de l'ordre de 200 μm, pour un dénivelé n'excédant pas 40 μm.

infrarouge, car ce métal ne présente pas de bande d'absorption sur ce domaine spectral. La figure II.9, présentée section II.2.1, montre les différentes surfaces de réflexion possibles. Pour obtenir un spectre proche de la signature spectrale des échantillons, le choix du background doit être en lien avec le type d'échantillon analysé. Dans l'étude à l'échelle macroscopique, les échantillons étudiés sont de type poudreux, l'étalon d'or lisse ne semblait donc pas correspondre à nos besoins. Le choix du background s'est tourné vers de l'or rugueux, nommé Infragold© proposé par Labsphère. La figure II.16 présente l'Infragold© et son profil de rugosité. Cet étalon est dans une enceinte purgée à l'air sec et surmontée d'un miroir parabolique et d'une fenêtre saphir (comme le couvercle du cryostat utilisé dans ce type d'expériences) de manière à réaliser l'acquisition de la référence sous une atmosphère sèche (sans eau et sans dioxyde de carbone atmosphérique, ou en tous cas avec un minimum d'eau et de CO_2^{gaz}). Cette référence d'une rugosité comparable à celle des échantillons étudiés permet une mesure directe de l'absorption sans avoir à tenir compte de la perte du signal par réflexion spéculaire. Aucune étude n'a été effectuée sur la rugosité du background. Cependant, la réflectance

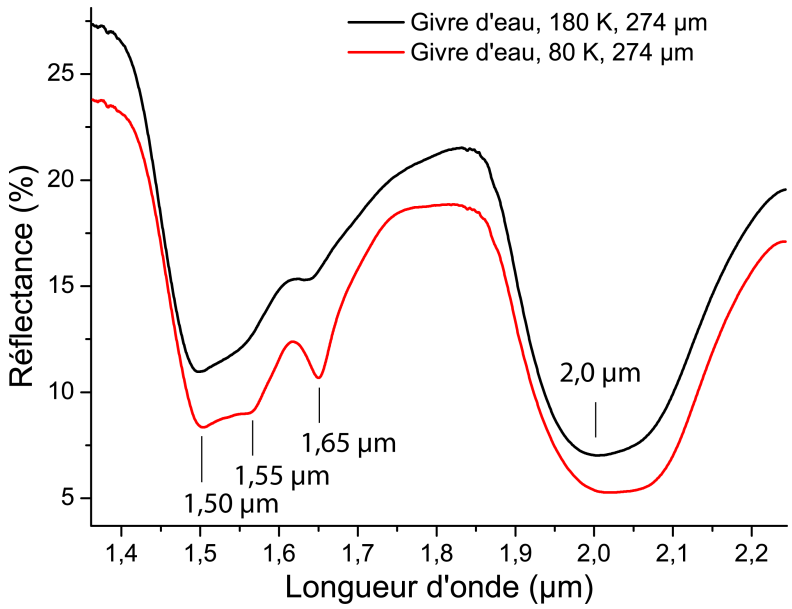


FIGURE II.17 – Spectres typiques d'un échantillon de glace d'eau à l'échelle macroscopique entre 1,35 et 2,25 μm à 80 et 180 K (respectivement rouge et noir) à 10^{-5} bar.

absolue des spectres dépend de la taille des rugosités du background. Cette partie demande encore à être explorée. La figure II.17 présente deux spectres en nombre d'onde d'échantillons rugueux de glace d'eau à 80 et 200 K, respectivement rouge et noir, à 10^{-5} bar obtenus avec l'Infragold©.

Echantillons à l'échelle microscopique

L'acquisition d'un background sur le fond en cuivre a été effectuée après la condensation du CO_2 dans la cellule. Ainsi, les spectres de dioxyde de carbone solide et de mélange de glaces à l'échelle microscopique présentent des bandes d'absorption caractéristiques des composants analysés. Le dioxyde de carbone encore présent dans l'atmosphère n'est pas exposé dans le spectre final puisque sa contribution est divisée par le spectre de référence. De plus, la condensation *in situ* du dioxyde de carbone gazeux

dans le cryostat permet d'être à l'abri des pollutions atmosphériques comme l'humidité ambiante. Cependant, une zone de l'échantillon a été polluée par une substance issue de l'appareillage expérimental. La figure II.18 présente la signature spectrale de cette pollution. Une comparaison automatique aux spectres contenus dans la bibliothèque spec-

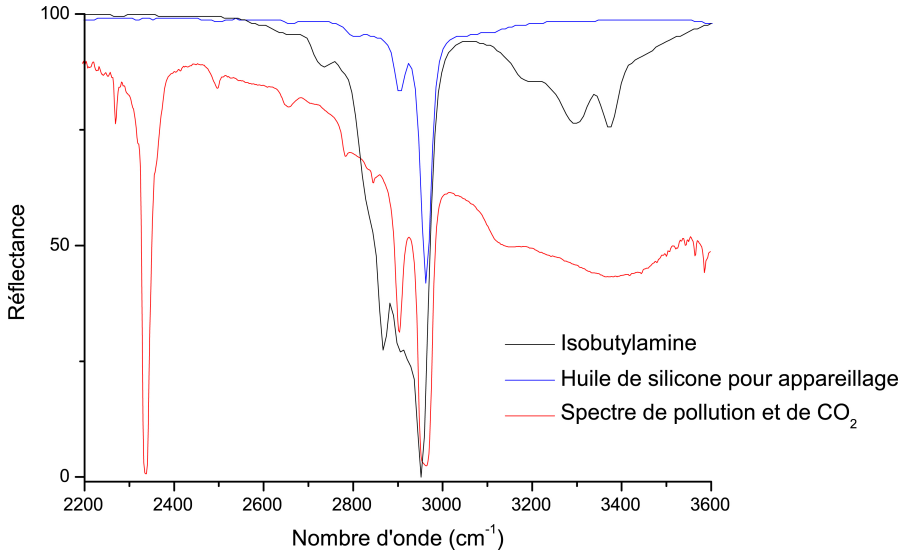


FIGURE II.18 – Spectre infrarouge de la pollution de nos échantillons (en rouge), identifiée par comparaison à de l'huile de silicone (en bleu) et de l'isobutylamine (en noir).

trale d'OMNIC© propose comme spectres cohérents avec notre dispositif, de l'huile de silicone pour appareillage et de l'isobutylamine. Les traces de silicone peuvent provenir de la colle utilisée pour adhérer la fenêtre en saphir à la cellule. L'identification de l'isobutylamine, dont la liaison N-H vibre à une longueur d'onde proche de 3,1 μm, par le logiciel provient de l'éventualité de formation d'une amine lors de l'interaction du dioxyde de carbone et du polyuréthane (Briscoe et Kelly, 1995). Cependant, les interactions entre ces deux derniers ont été fortement limitées par le dispositif expérimental. Les traces de pollution dans l'atmosphère de la cellule sont éliminées par le background.

Résumé

Le tableau II.2 est un résumé des backgrounds utilisés pour chaque composant étudié :

TABLE II.2 – Background des constituants étudiés

Echelle	Macroscopique			Microscopique			
Composant	H_2O^{Sol}	H_2O^{Sol} +CO_2^{Sol}	Clathrates de CO_2	CO_2^{Sol}	CO_2^{gaz}	H_2O^{Sol} +CO_2^{Sol}	Clathrates de CO_2
Background	Infragold©			Fond de la coupelle en cuivre			

II.2.4 Lien entre l'observation naturelle et les expériences de laboratoire

Les spectres des surfaces naturelles sont complexes. Très souvent, pour ne pas dire tout le temps, les surfaces naturelles ne sont pas composées de matériaux purs mais d'un mélange de plusieurs composants. L'ensemble des constituants vont participer selon leur proportion et l'intensité de leur signature propre à la production d'un spectre qui sera finalement représentatif de ce mélange. Pour déterminer, à partir de la signature infrarouge, la composition de la surface, la possession d'une bibliothèque spectrale pertinente est essentielle. Cette bibliothèque spectrale ne peut alors se construire qu'à partir de spectres de référence produits en laboratoire dans un environnement bien contraint. La nature du mélange, les tailles et la répartition des grains dans l'échantillon doivent être contrôlés au mieux, de même que la température lors de l'acquisition du spectre.

Cette section a rappelé quelques principes de la spectroscopie infrarouge, a décrit le spectromètre du laboratoire, a présenté les surfaces de référence utilisées pour l'étude et a discuté du lien existant entre les surfaces naturelles et les échantillons de laboratoire. Des spectres ont été acquis sur des échantillons glacés en laboratoire. Les différentes

signatures des glaces étudiées dans ce travail doivent être traitées numériquement après l'acquisition. Différents logiciels et méthodes sont présentés dans la section suivante. Le choix de la méthode de traitement représente une part importante de ce travail.

II.3 Les logiciels de traitement des spectres

A la suite du travail expérimental (voir Chapitres III et IV), des études numériques ont été réalisées de manière à permettre une interprétation des spectres infrarouges des glaces d'eau et de dioxyde de carbone. La signature spectrale de la glace d'eau pure, voir section I.1.3, a été examinée de manière détaillée pour élaborer une loi de dépendance de cette signature avec la température et la taille de grains. Cette partie présente les méthodes qui ont été employées à cet effet. Les méthodes traditionnellement employées pour analyser les spectres infrarouges sont les ajustements par sommation de gaussiennes. Les fonctions gaussiennes modélisent les absorptions physiques et permettent ainsi de déterminer les différentes caractéristiques des bandes d'absorption (position, largeur, profondeur, aire). Cette méthode a été utilisée à travers un programme et un logiciel indépendants l'un de l'autre : le Modèle Gaussien Modifié (MGM), (Sunshine et al., 1990), et le logiciel OriginPro©. Un nouveau protocole d'étude de la signature spectrale de la glace d'eau est également proposé dans cette section. Les spectres de dioxyde de carbone, de mélange de glaces d'eau et de dioxyde de carbone ainsi que de clathrates de CO_2 n'ont pas été étudiés dans le but d'élaborer une telle loi mais pour comprendre l'influence du dioxyde de carbone sur la signature infrarouge de la glace d'eau. Les traitements numériques appliqués sur ces derniers sont seulement un lissage et un retrait du continuum (voir section II.3.1). Presque la totalité des programmes utilisés ont été écrits pour les différentes études. Seul le programme MGM (Modèle Gaus-

sien Modifié), créé par Sunshine et al. (1990) puis modifié par Combe et al. (2005) pour une automatisation du programme sur des images (ou cubes) hyperspectrales écrit sous IDL, n'a pas été créé par nos soins. La procédure de traitement des spectres de laboratoire s'est construite sur plusieurs mois. Divers programmes, élaborés sous Fortran 77, IDL 4.7 ou OriginC en collaboration avec les membres de l'équipe, ont contribué à une étude numérique robuste. Cette section présente les méthodes numériques appliquées sur les spectres de glace d'eau. D'abord, les procédures de lissage et retrait du continuum sont présentées. Puis, le principe de fonctionnement et les détails du programme MGM sont exposés. Ensuite, les études et les programmes écrits sous Origin Pro© sont expliqués. Enfin, les études sur les aires des bandes d'absorption sont décrites.

II.3.1 Lissage et continuum

Les premiers traitements numériques appliqués sur les spectres sont des traitements simples de lissage et de retrait du continuum. Cette partie explique précisément ces procédures.

Lissage des spectres

Les instruments de laboratoire utilisés pour l'analyse des échantillons ont des résolutions différentes et possèdent un bruit intrinsèque qui affecte potentiellement la mesure expérimentale. La précision des spectres infrarouges revient aux différents capteurs du spectromètre (séparatrice et détecteur) qui limitent le domaine spectral de l'étude. La sommation de spectres durant l'acquisition permet d'améliorer le rapport signal sur bruit. Cependant, des traitements numériques peuvent être appliqués sur les données de manière à minimiser les bruits de l'appareil et mettre en évidence les véritables don-

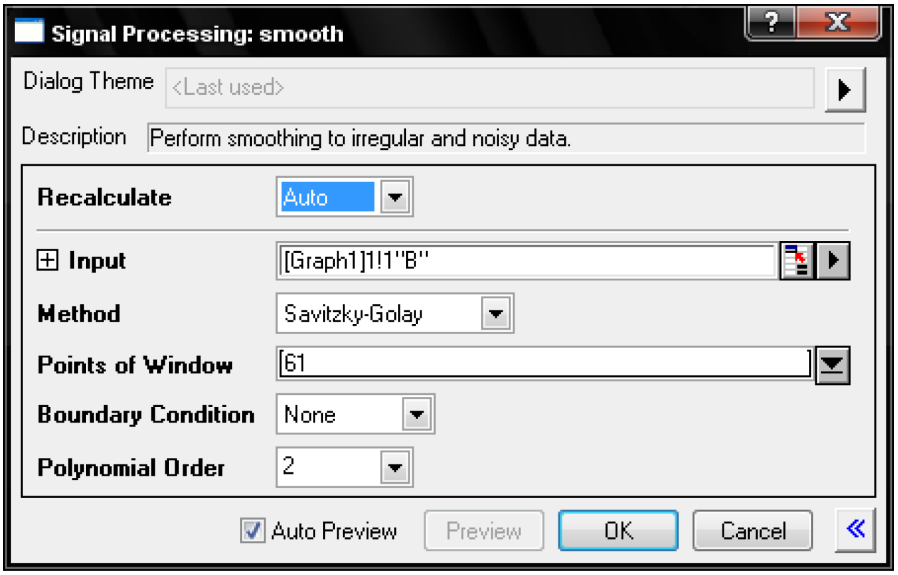


FIGURE II.19 – Présentation de la boîte de dialogue de la fonction de lissage sous Origin Pro©. L'ensemble des paramètres de la fonction sont modifiables avec cette interface.

nées. Le lissage des spectres a été effectué sous Origin Pro© qui intègre des fonctions propres à ce type de traitement. Le logiciel possède un module « *Smoothing* » qui se présente sous la forme d'une boîte de dialogue dans laquelle les paramètres de la fonction de lissage sont modifiables. La figure II.19 présente la boîte de dialogue de la fonction de lissage sous l'interface d'Origin Pro©. De plus, cette fonction est facilement exportable dans un programme d'automatisation écrit sous OriginC. Ce programme se trouve en annexe (C). Les spectres ont été lissés avec la méthode de Savitzky-Golay, (Savitzky et Golay, 1964), qui utilise une régression polynomiale dont l'ordre du polynôme est modifiable, pour ajuster au mieux celui-ci sur un nombre (paramétrable) de points du spectre. Le lissage permet d'une part, d'améliorer la qualité du rapport signal sur bruit obtenu par l'instrument de mesure et, d'autre part, d'affiner la précision des épaulements et des creux des bandes d'absorption. Cette amélioration est nécessaire pour définir avec exactitude les lignes de base des différentes bandes d'absorption (voir

le paragraphe suivant). Pour minimiser le bruit sans enlever d'informations importantes (les caractéristiques des bandes d'absorption), deux niveaux de traitement ont été appliqués sur les spectres de glace d'eau entre 1 et 2,5 μm : i) le premier, un niveau élevé de lissage (polynôme d'ordre 2 sur une fenêtre de 61 points, 30 points de part et d'autre du centre), a été exécuté sur le bord du spectre (à proximité de la limite du capteur) entre 1 et 1,35 μm et ii) le second, un niveau moindre (sur 31 points avec un polynôme d'ordre 2) sur le reste du domaine d'étude. Les spectres de dioxyde de carbone n'ont pas été lissés pour ne pas perdre trop d'informations car les bandes sont plus fines. La figure II.20 montre les résultats du lissage sur un exemple de spectre brut.

Elaboration du continuum

Le continuum, ou ligne de base, est défini comme l'enveloppe d'un spectre sur laquelle se dessinent les bandes d'absorptions. La figure II.21 est un schéma simple qui définit la notion du continuum. L'étude du continuum en spectroscopie est un traitement élémentaire et nécessaire avant toute analyse de bandes d'absorption. Les programmes d'ajustement de bandes d'absorption sur l'ensemble d'un spectre comme le MGM, (voir section II.3.2), nécessitent l'introduction d'un continuum qui dessine globalement la forme du spectre. Cependant, si les bandes d'absorption sont étudiées localement, en dehors du spectre, le continuum peut alors être défini comme une droite joignant les deux épaulements d'une bande selon Clark et Roush (1984). De plus, l'approche adoptée par Clark et Roush (1984) permet de s'affranchir de l'effet du continuum tout en normalisant le spectre. La normalisation des spectres est un traitement numérique qui permet de rendre des spectres issus de différentes analyses comparables entre eux. En effet, les valeurs de réflectance des spectres bruts sont très dépendantes de l'environnement d'acquisition (la lumière incidente, la rugosité et la topographie de l'échantillon,

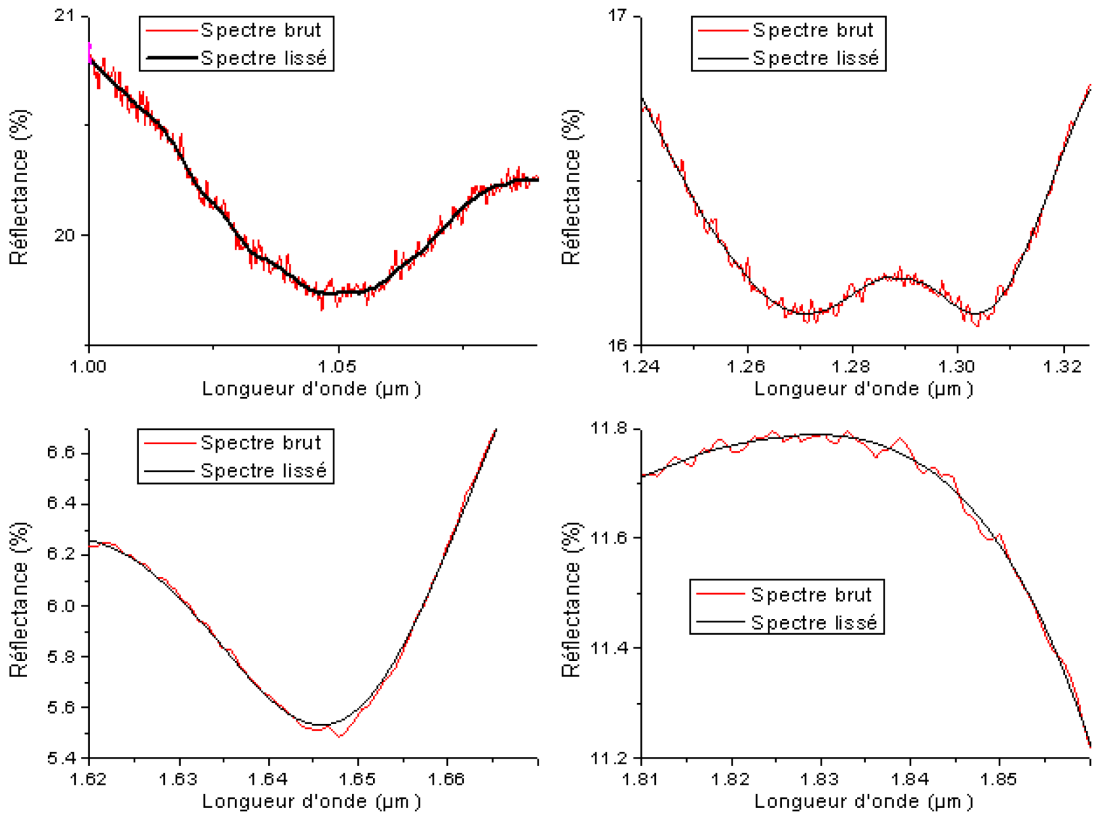


FIGURE II.20 – Représentation graphique des résultats de lissages par la méthode Savitzky-Golay sous Origin Pro©. a) Résultat du lissage de la bande à 1,03 μm qui est la plus bruitée à cause de la limite du capteur. b) Résultat du lissage de la bande à 1,30 μm. c) Résultat du lissage de la bande à 1,65 μm. d) Résultat du lissage sur les épaulements des bandes d'absorption. Les lissages adoptés fournissent d'excellents résultats (a, d) sans compromettre les structures plus délicates (b, c).

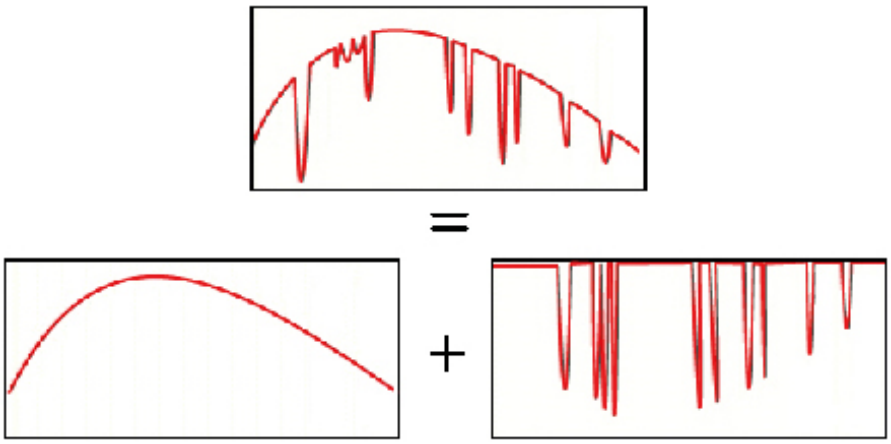


FIGURE II.21 – Représentation schématique simple de la décomposition d'un spectre en la somme de son continuum et de ses bandes d'absorption. Ces images proviennent de l'Agence spatiale du Canada, http ://www.asc-csa.gc.ca/fra /educateurs/ressources/scisat/3sec-spectres.asp

l'angle d'incidence, le background, les capteurs du spectromètre ...). Ainsi, nous avons choisi de réaliser une étude bande par bande en considérant un continuum linéaire pour chaque partie de spectre et en normalisant chaque bande d'absorption par son continuum selon l'équation II.1 de Clark et Roush (1984).

$$R_n(\lambda_i) = \frac{R_c(\lambda_i) - R(\lambda_i)}{R_c(\lambda_i)}, \tag{II.1}$$

où $R_n(\lambda_i)$ est la réflectance normalisée à la longueur d'onde λ_i, $R_c(\lambda_i)$ est la valeur du continuum à la longueur d'onde λ_i et $R(\lambda_i)$ est la réflectance du spectre brut à la longueur d'onde λ_i. Le continuum de chacune des quatre bandes d'absorption étudiées dans le cas de l'eau pure a été défini par les points suivants :

- entre 1,000 μm (canal spectral n°1) et 1,088 μm (canal spectral n°420) pour la première bande
- entre 1,160 μm (canal spectral n°715) et 1,345 μm (canal spectral n°1330) pour

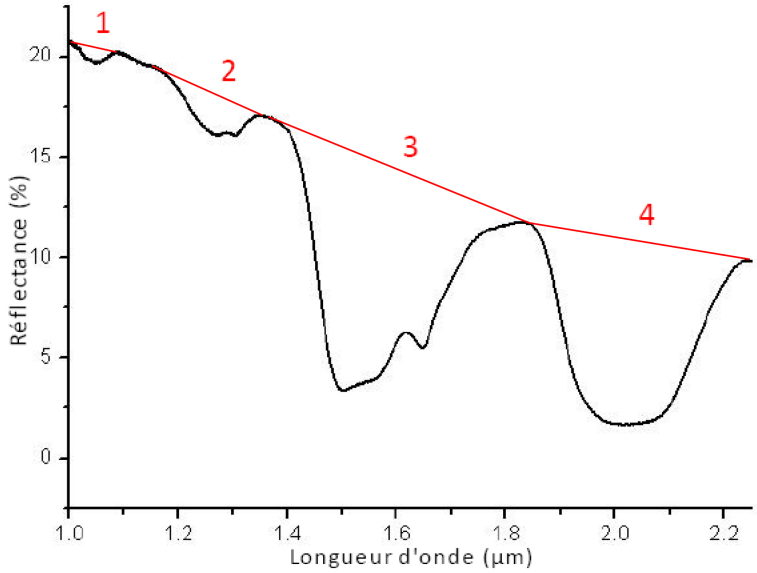


FIGURE II.22 – Représentation des quatre continuums définis par des droites joignant les épaulements des bandes d'absorption.

la deuxième bande

– entre 1,359 μm (canal spectral n°1370) et 1,832 μm (canal spectral n°2355) pour la troisième bande
– entre 1,838 μm (canal spectral n°2365) et 2,244 μm (canal spectral n°2875) pour la quatrième bande

La figure II.22 définit graphiquement les positions des quatre continuums

Maintenant que les spectres sont lissés, découpés et normalisés, le traitement numérique sur l'étude des bandes d'absorption peut commencer. L'ajustement des spectres par des gaussiennes a été réalisé d'une part par la méthode du MGM de Sunshine et al. (1990), et d'autre part, avec le logiciel Origin Pro©. L'aire des bandes d'absorption a également été étudiée. Ces trois méthodes sont présentées ci-après.

II.3.2 Le Modèle Gaussien Modifié

Le programme de traitement, MGM de Sunshine et al. (1990), est assez complexe à déchiffrer. Il permet de traiter plusieurs types de spectres, avec plusieurs types de continuum. Aussi, les traitements de lissage et de retrait de continuum n'ont pas été appliqués sur les spectres en amont des calculs réalisés par le MGM. Par souci de simplification pour des utilisateurs futurs qui exploiteront le MGM dans les mêmes conditions que les traitements présentés ici, le programme a été, en partie, réécrit avec la collaboration de M. Giraud, ingénieur au laboratoire, de manière plus simple mais plus limpide. Cette partie explique dans un premier temps, le principe de la méthode d'ajustement de spectre par sommation de fonctions gaussiennes, puis, dans un second temps, l'élément essentiel de la compréhension du MGM est décrit.

Principe de la méthode

Le Modèle Gaussien Modifié recalcule des spectres expérimentaux ou naturels à l'aide de fonctions gaussiennes modifiées, (Sunshine et al., 1990), *i.e.* en longueur d'onde et non en nombres d'onde. La fonction du spectre s'écrit alors sous la forme d'une somme de gaussiennes et d'un continuum présentée par l'équation II.2 :

$$F(\lambda) = \sum_{k=1}^{n} G_k(\lambda) + continuum(\lambda), \tag{II.2}$$

avec

$$G_k(\lambda) = -A_k \exp -\frac{(\lambda - \lambda_{0,k})^2}{2\sigma_k^2}, \tag{II.3}$$

$$continuum(\lambda) = \alpha\lambda + \beta, \tag{II.4}$$

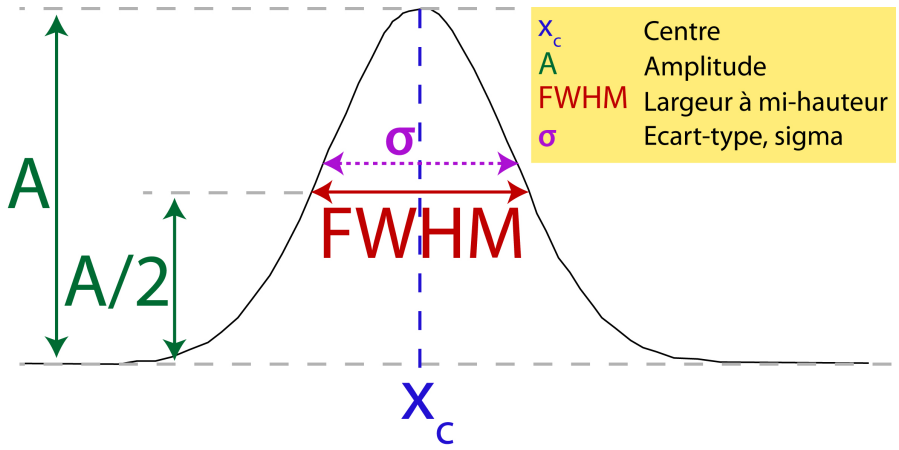


FIGURE II.23 – Graphique représentatif des définitions des paramètres des gaussiennes utilisées.

où

$$\sigma_k = FWHM_k/(2\sqrt{2\ln 2}). \tag{II.5}$$

La figure II.23 montre graphiquement les définitions des paramètres de la gaussienne utilisée. Le continuum est ajusté sur le logarithme népérien du spectre en nombre d'onde, de manière à obtenir un continuum linéaire en nombre d'onde. Ensuite, chaque gaussienne est ajustée par une inversion de type Tarantola et Valette (1982). A l'issue de l'ajustement, le MGM calcule un critère de qualité (voir équation II.6), le résidu ou RMS (*Root Mean Square*), qui correspond à la racine carrée de la moyenne des carrés de la différence entre le spectre à ajuster et le résultat de l'ajustement.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(R(\lambda_i) - R'(\lambda_i))^2} \tag{II.6}$$

avec n, le nombre de longueur d'onde, $R(\lambda_i)$ la valeur de la réflectance du spectre à ajuster à la longueur d'onde λ_i, et $R'(\lambda_i)$, la valeur de la réflectance du résultat de l'ajustement à la longueur d'onde (λ_i). La figure II.24 représente le résultat de l'ajus-

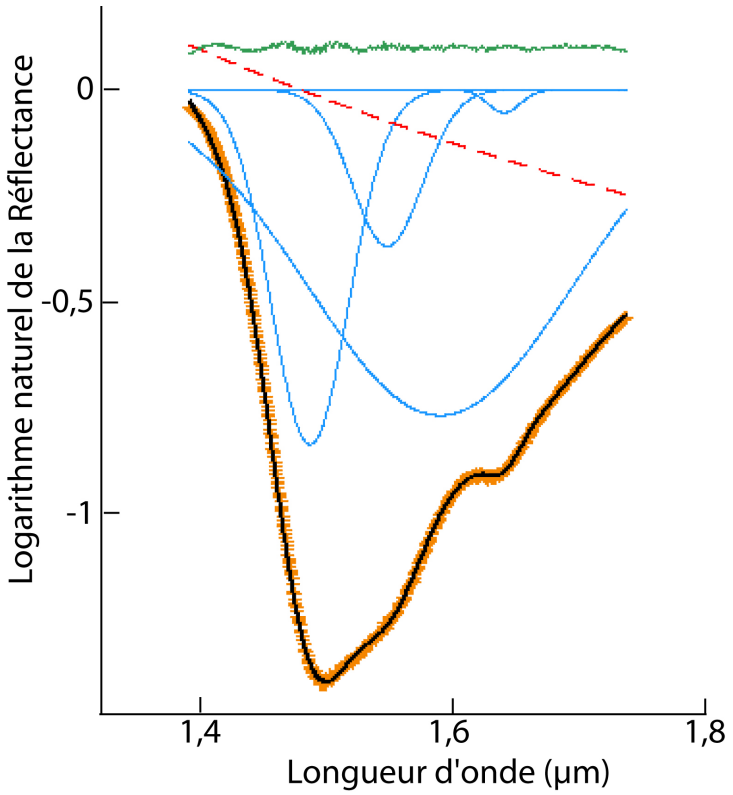


FIGURE II.24 – Graphique représentatif des résultats de l'ajustement du MGM. La courbe orange est le spectre expérimental à ajuster, la courbe noire est le résultat de l'ajustement, les courbes bleues sont les gaussiennes qui ont permis l'ajustement, la courbe rouge est le continuum et la courbe verte est le résidu.

tement (en noir) d'un spectre expérimental d'un échantillon de glace d'eau à 180 K et 477 μm (en orange). La courbe noire est issue de la somme des gaussiennes (en bleues) et du continuum (en rouge). Le critère de qualité défini précédemment est représenté en vert.

Cette analyse numérique a pour objectif de déterminer à partir d'un spectre de glace d'eau une température et une taille de grains. Les spectres expérimentaux vont permettre d'élaborer une équation entre les critères du spectre et la température et la taille de grains connues de l'échantillon. Par inversion de la loi, les température et taille de grains d'un échantillon inconnu seront déterminables à partir de son spectre. Or, les bandes d'absorption de la glace d'eau sont plus ou moins ajustables avec cette méthode selon la forme des bandes d'absorption. En fait, le bon ajustement du programme est très fortement lié au fichier « paramètres d'entrée ».

Le coeur du programme

La compréhension de ce fichier de paramètres est nécessaire pour l'amélioration de l'ajustement. Les paramètres de ce fichier vont varier en fonction du spectre à ajuster. Seul le fichier « paramètres » utilisé pour l'étude sera présenté. Il s'écrit sous la forme :

Titre du graphique des résultats			
Canaux spectraux pour la couleur de l'image :		Rouge	Vert Bleu
Min de l'axe des ordonnées	Max de l'axe des ordonnées		Pas de graduation
Min de l'axe des abscisses	Max de l'axe des abscisses		Pas de graduation
RMS min	Min de la différence entre deux calculs de RMS		Nombre d'itération
Type de continuum : Linéaire en "WaveNumber"			
Deux points d'ancrage pour évaluer un point du continuum		Deux autres pour le deuxième point	
Limites de vérification de l'ordonnée à l'origine du continuum		Limites de vérification de la pente du continuum	
Facteur d'échelle de l'axe des ordonnées		Facteur d'échelle de l'axe des abscisses	
Nombre de gaussiennes utilisées pour l'ajustement			
Liste des centres des quatre gaussiennes	Liste des largeurs des quatre gaussiennes	Liste des fluctuations sur les centres	Liste des fluctuations sur les largeurs
Intervalles de longueur d'onde exclus du calcul			
Nombre d'intervalles			
Liste des intervalles : une valeur de début et une valeur de fin			

Les canaux spectraux (longueur d'onde en nanomètre) pour la couleur de l'image ne sont utiles que dans le cas d'un traitement d'une image hyperspectrale. Dans ce travail, seul le type Lwn (Linear in wavenumber) a été utilisé pour le continuum. Les points d'ancrage (longueur d'onde en nanomètre) permettent d'établir la droite du continuum

avant de l'ajuster et de la contraindre avec les limites données à la ligne suivante. Le facteur d'échelle de l'axe des ordonnées n'a pas été utilisé dans ce travail, sa valeur a été fixée à 1. L'ajustement du fichier « paramètres » permet d'améliorer le calcul du MGM. Toutes les valeurs des centres et largeurs de gaussiennes ainsi que leur fluctuations sont à donner en nanomètre. Enfin, les intervalles sont des longueurs d'onde en nanomètre entre lesquels le spectre ne sera pas ajusté. Actuellement, l'ajustement calculé par le MGM utilise également les profondeurs des bandes mais elles sont évaluées par le programme lors du calcul itératif par l'équation II.7, et ne sont donc pas à indiquer dans le fichier « paramètres ».

$$P = -\sqrt{|R_{spectre}(\lambda) - R_{continuum}(\lambda)|} \tag{II.7}$$

Les spectres expérimentaux sont rangés en bibliothèques spectrales (fichiers regroupant une liste de spectres) lisibles par ENVI, une extension d'IDL. Le traitement, effectué sur l'ensemble des spectres de la bibliothèque s'applique sur un domaine spectral réduit à une large bande d'absorption de la glace d'eau autour de 1,5 μm (6666 cm^{-1}). Dans ce domaine, la bande de l'eau se décompose en une somme de quatre gaussiennes, (Clark, 1981b), et d'un continuum (figure II.24). A l'issue de ce traitement, les critères des bandes d'absorption, et, par conséquent, ceux des gaussiennes, sont listés dans un fichier (nom_de_la_bibliothèque_spectrale_mgmp).

Ainsi, un bon fichier « paramètres » permet d'ajuster correctement un grand nombre de spectres d'une liste. Certains spectres de la liste ne sont pas très bien ajustés, principalement ceux dont la température est basse et qui ont par conséquent des caractéristiques spectrales pointues (la bande à 1,65 μm est fine et profonde quand la température est faible). Aussi, le Logiciel OriginPro© a également été utilisé, indépendamment du

MGM, pour ajuster les spectres et comparer les résultats obtenus avec ceux du MGM.

II.3.3 Le Logiciel OriginPro©

OriginPro© 8 SR5 est un logiciel développé par OriginLab Corporation. Ce logiciel a été utilisé pour comparer les résultats obtenus par le MGM et éventuellement, si les résultats étaient meilleurs, exploiter davantage ce logiciel pour notre étude. L'algorithme utilisé dans ce logiciel de calcul n'est pas une inversion de Tarantola et Valette (1982) mais un calcul itératif du type Levenberg-Marquardt décrit par Moré (1978). Dans cette partie, la procédure d'analyse des spectres sous Origin Pro© à partir du module « *Peak Analyzer* »est développée. Puis, l'automatisation de la procédure de traitement sera présentée.

Le module « *Peak Analyzer* » d'Origin Pro©

L'achat de la licence d'Origin Pro© a permis de réaliser une étude comparative au MGM. L'utilisation du module « *Peak Analyzer* » est détaillée dans cette partie. Ce module implémenté dans Origin Pro© permet de décomposer des bandes d'absorption en somme de gaussiennes et d'un continuum, selon le même principe que le MGM. Origin Pro© possède également un langage de programmation objet, inspiré du C et C++, et donne donc la possibilité d'automatiser des tâches répétitives comme le traitement identique de plusieurs centaines de spectres.

Cette partie détaille la procédure de traitement d'un spectre en 6 étapes qui permettra l'écriture d'un programme d'automatisation sous OriginC. Après le tracé des données (longueur d'onde, réflectance) du spectre importé, réduit au domaine spectral de l'étude, la boîte de dialogue de « *Peak Analyzer* »est ouverte. La figure II.25 présente la

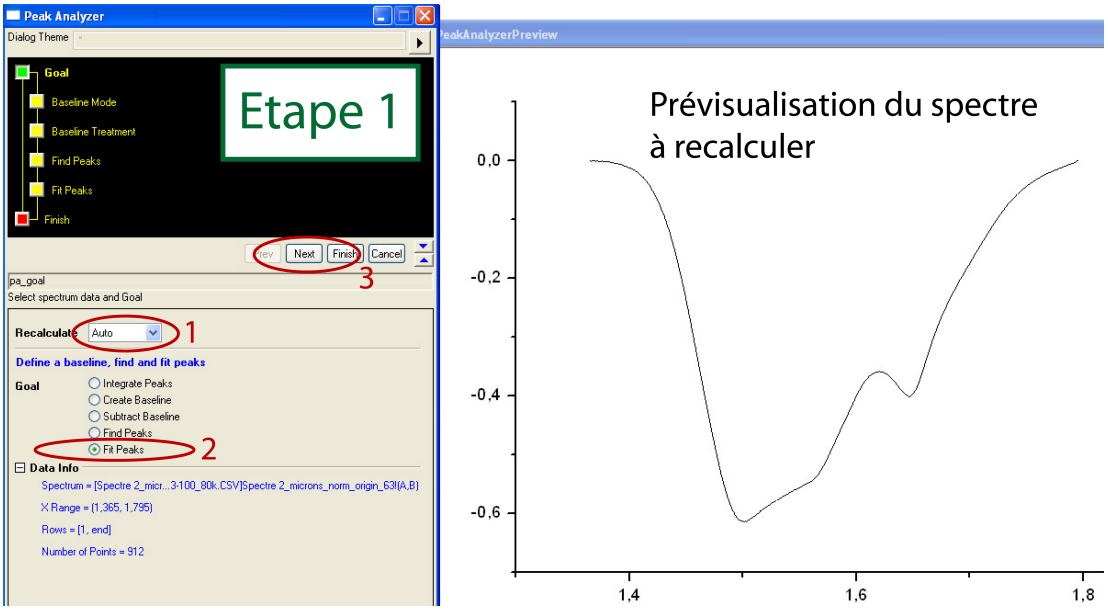


FIGURE II.25 – Etape 1 : Choix du type de traitement.

première étape de traitement du spectre. La signature spectrale utilisée pour l'exemple à droite sur toutes les figures d'explication de « *Peak Analyzer* » est issue d'un échantillon à 80 K tamisé entre 63 et 100 μm. Lors de la première étape, la possibilité de choisir un calcul manuel et automatique est proposé au premier stade. Le choix se porte vers le calcul automatique de manière à visualiser les changements effectués sur les critères des gaussiennes (voir étape 4) en direct. Le deuxième stade permet de choisir le type de traitement à accomplir. Dans le cadre de l'étude, l'option « *Fit Peaks* », ou ajustement des bandes, est sélectionnée. La figure II.25 montre les options sélectionnées pour l'étude. L'étape suivante concerne le choix de la ligne de base (continuum). Le domaine spectral des données importées est réduit au domaine d'étude par des traitements numériques précédents. Le retrait du continuum est également effectué avant l'importation des données dans Origin Pro©. Le choix de la ligne de base s'oriente donc vers « *None* », ce qui correspond à « aucune ligne de base n'est calculée sur le spectre » (figure II.26).

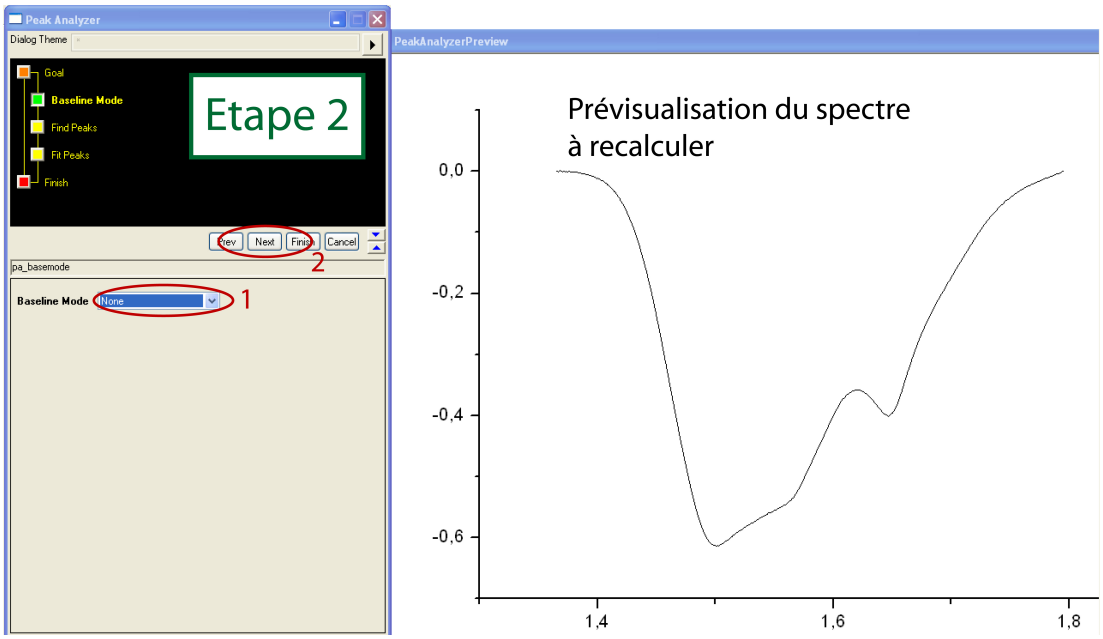


FIGURE II.26 – Etape 2 : Choix du type de continuum.

L'étape suivante, visible sur la figure II.27, est le coeur du sujet. Elle concerne le choix du nombre et du positionnement, directement sur le spectre, des gaussiennes représentatives des bandes d'absorption, (n°1 sur la figure II.27). Comme pour le MGM, le choix de quatre gaussiennes permet d'ajuster au mieux le haut des ailes des bandes d'absorption. Dans la partie « *Peak Finding Settings* », (n°2 sur la figure II.27), le choix de la direction des pics est proposé. Dans ce travail, seules des gaussiennes négatives sont acceptables. Le choix de la méthode avec laquelle le logiciel détermine les bandes d'absorption est également proposé. Dans cette étude, le choix s'est porté vers les dérivées secondes qui permettent de déterminer à la fois la position des extrema d'une courbe et son orientation en ces points (convexe ou concave). La figure II.28 présente la quatrième étape qui se tourne vers le nombre d'itérations (5000) et la précision souhaités pour le calcul (1.10^{-15}) ainsi que la possibilité de changer le nombre de points par gaussiennes, fixé dans ce travail à 1000 (contrairement à la méthode MGM qui calcule des

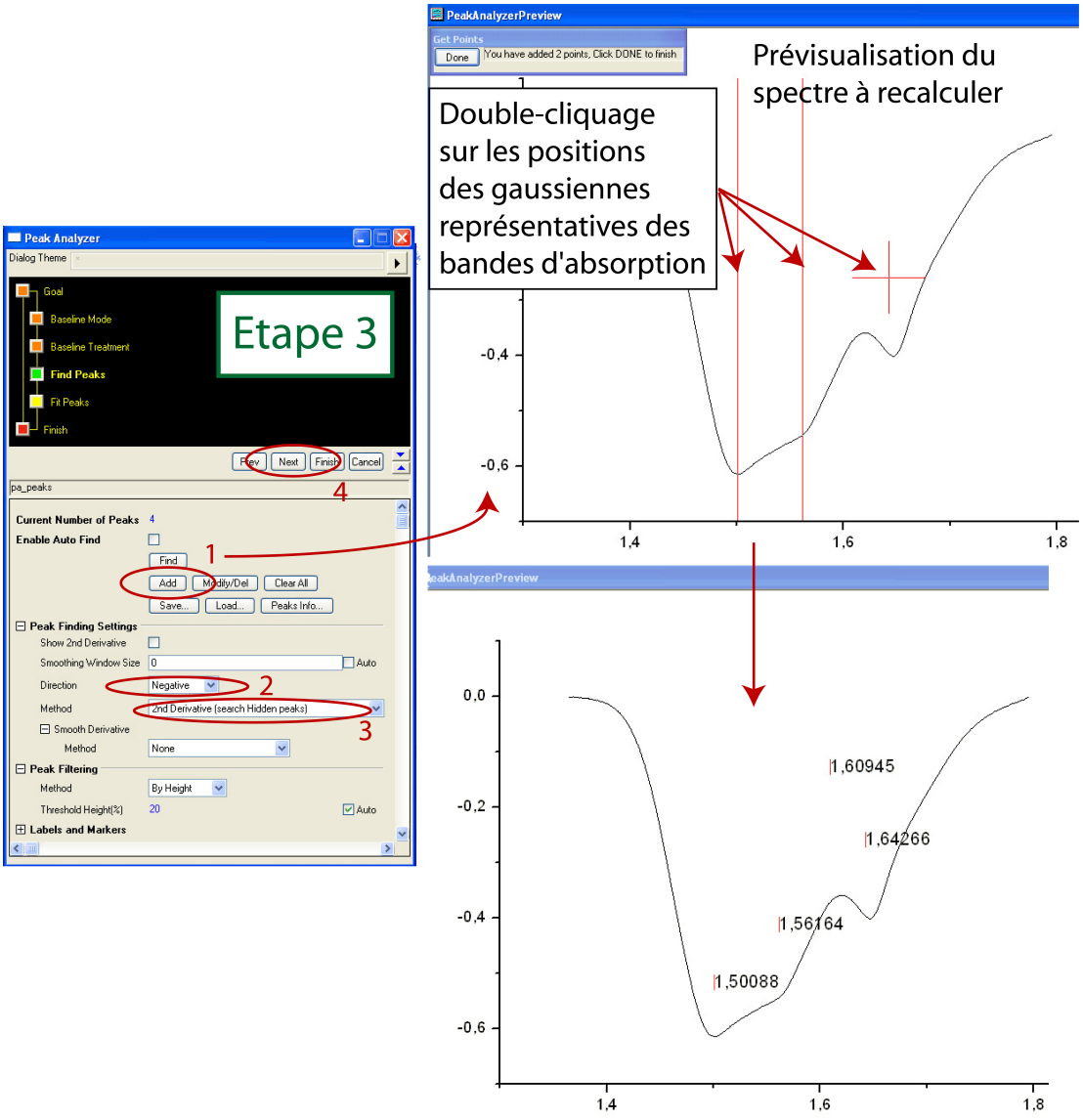


FIGURE II.27 – Etape 3 : Choix du nombre et de la position des gaussiennes.

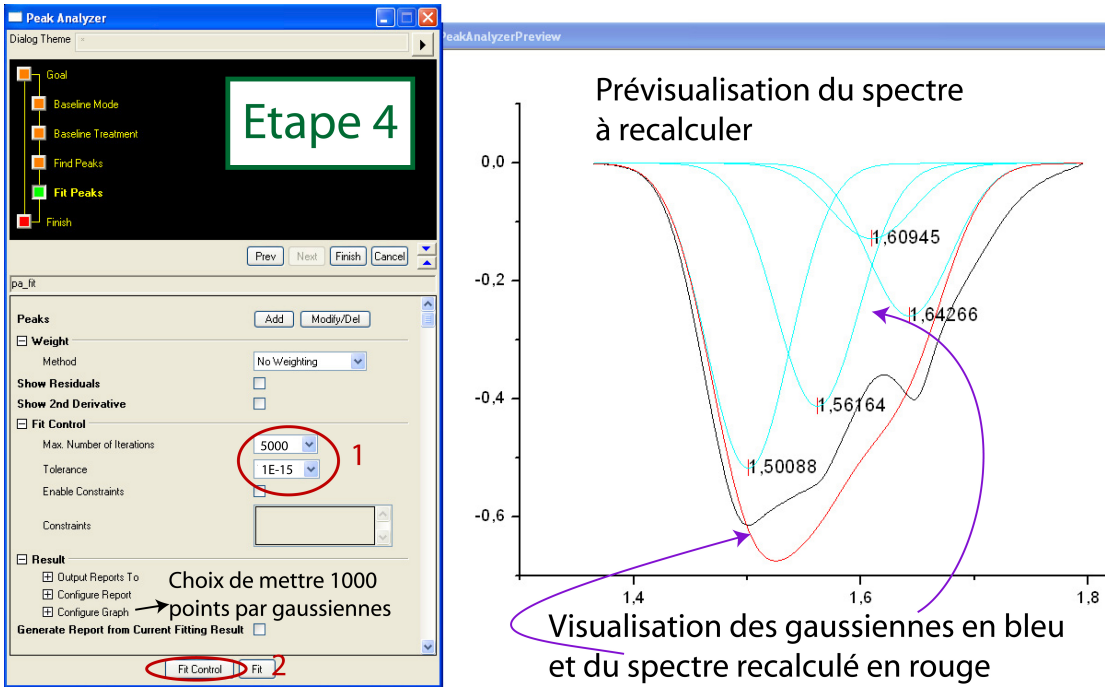


FIGURE II.28 – Etape 4 : Choix du nombre d'itérations, de la précision du calcul et du nombre de points par gaussienne.

gaussiennes avec la même résolution spectrale que le spectre d'entrée). La partie « *Fit Control* » en bas de la boîte de dialogue ouvre un tableau dans lequel la liste des gaussiennes est répertoriée. La figure II.29 montre les possibilités du calcul qu'offre cette procédure. Le premier stade est de choisir le type de fonction utilisée pour le calcul du spectre. Dans cette étude, le choix s'est tourné vers « *GaussAmp* » dont l'équation (II.8) est identique à la fonction utilisée dans le MGM (de manière à pouvoir comparer).

$$G_k(T, D, \lambda) = A_k \exp\left[-\frac{(\lambda - \lambda_{0,k})^2}{2\sigma_k^2}\right] \tag{II.8}$$

où

$$\sigma_k = FWHM_k/(2\sqrt{2\ln 2}) \tag{II.9}$$

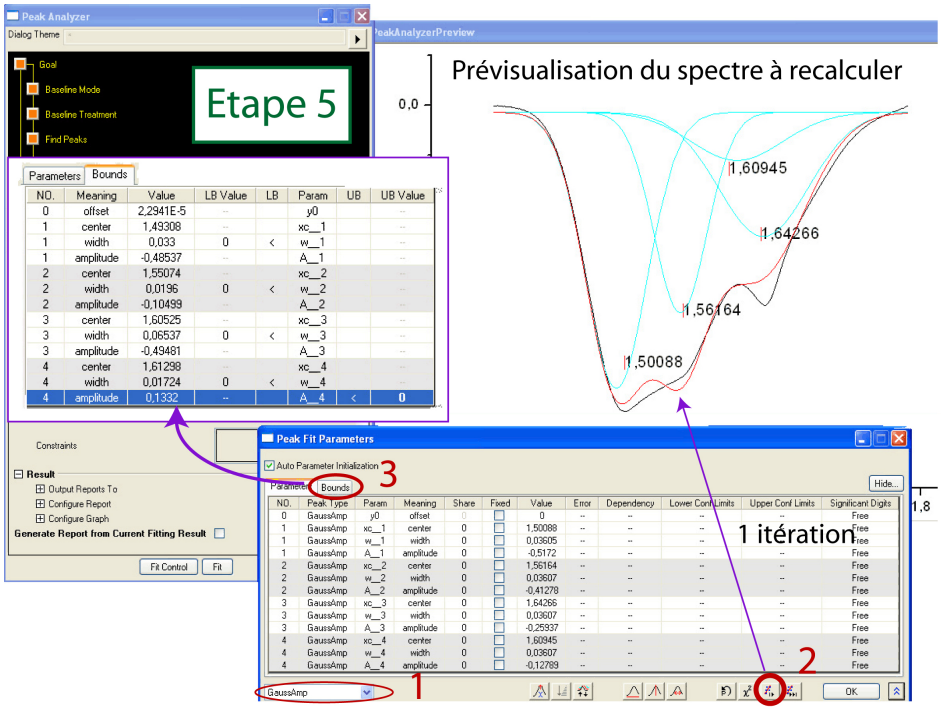


FIGURE II.29 – Etape 5 : Contrôle sur les critères (position, largeur, profondeur) des bandes d'absorption.

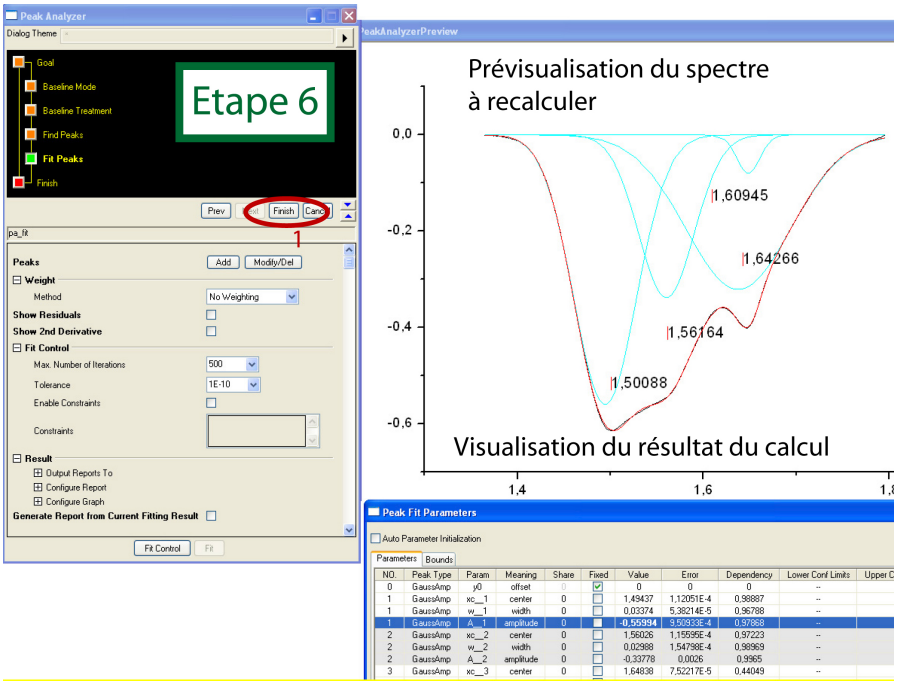


FIGURE II.30 – Etape 6 : Résultat du calcul itératif jusqu'à la convergence.

Ensuite, la boîte de dialogue « *Fit Control* » donne la possibilité d'itérer une fois ou d'itérer jusqu'à la convergence. Afin de déterminer de bons paramètres initiaux, le choix se porte vers l'itération unique. La courbe rouge sur le graphique est issue du calcul après une itération. Ensuite, il est possible de changer les valeurs des critères de gaussiennes (centre, largeur, amplitude) de manière à optimiser le calcul final. L'onglet « *Bounds* » permet d'introduire des limites sur la fluctuation des critères. Finalement, la figure II.30 est le résultat de l'étape 6, *i.e.* le calcul itératif jusqu'à la convergence. Un clic sur le bouton « *Finish* » permet de sortir du module « *Peak Analyzer* » en obtenant le résultat final. L'étape suivante est un résumé du calcul, il donne les résultats sur les centres, largeurs, amplitudes et aires de chaque gaussiennes.

Ces résultats se retrouvent dans les onglets des feuilles d'Origin Pro©. Les figures II.31 et II.32 en sont un exemple.

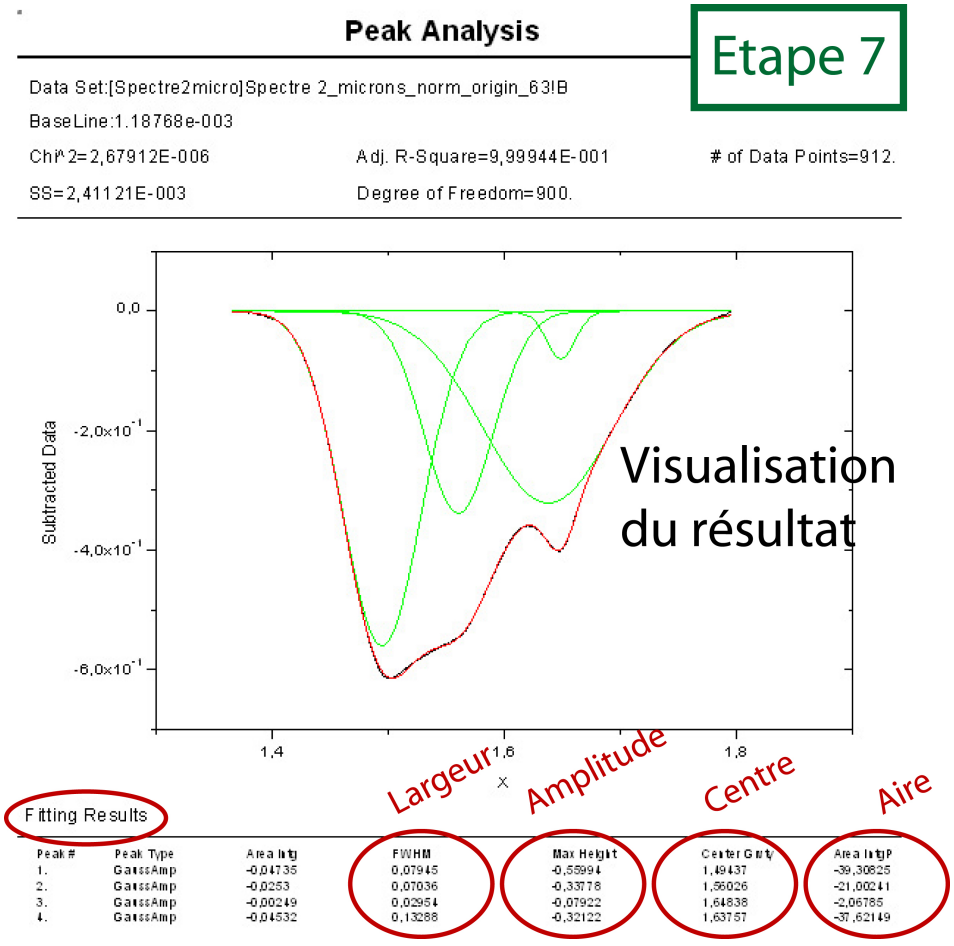


FIGURE II.31 – Etape 7 : Résultat du calcul itératif jusqu'à la convergence.

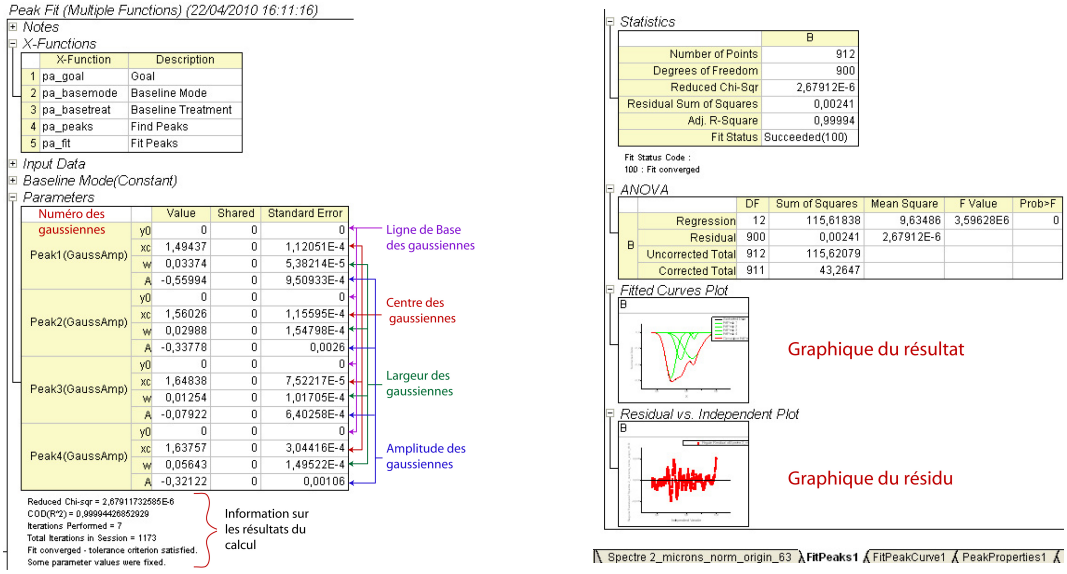


FIGURE II.32 – Résultats lisibles sur les feuilles d'Origin Pro©.

Ce module « *Peak Analyzer* », présenté ainsi, permet l'étude d'un spectre. La procédure est ensuite enregistrée sous un « *Thème* ». Pour analyser plus rapidement l'ensemble des spectres, Origin Pro© permet l'utilisation d'un langage de programmation numérique, OriginC, inspiré du C et C++.

Automatisation de la procédure

La réalisation d'un programme numérique pour automatiser l'analyse des spectres expérimentaux a été effectuée en collaboration avec M. Giraud, ingénieur au laboratoire, et O. Bollengier, stagiaire de Master II. Le programme est disponible en annexe C.

L'objectif du programme est d'utiliser le « *Thème* » précédemment défini sur un spectre et de l'appliquer de manière automatique sur l'ensemble des spectres d'un répertoire. Lors de ce travail, plusieurs problèmes ont été rencontrés. Tout d'abord, un « *bug* » a été détecté quand les spectres d'entrée possèdent encore leur continuum et qu'il faut l'adapter pour chacun d'entre eux, le logiciel ne soustrait que les valeurs du

continuum du premier spectre. C'est pourquoi, le continuum a été retiré des données d'entrée, en amont du programme. De plus, Origin Pro© ne propose, dans le module « *Peak Analyzer* », que de soustraire et non de diviser le continuum des spectres. Pour réaliser la division des spectres, comme dans le MGM, un programme en amont du module aurait pu être rédigé.

Enfin, l'ajustement des spectres n'est pas toujours optimal. Quelques uns sont donc ré-ajustés manuellement. Malgré ces problèmes, cette automatisation a permis un gain de temps considérable et l'obtention de nouveaux critères de gaussiennes.

Après cette présentation des procédures de traitement par le MGM et sous OriginPro©, d'autres critères, autres que les paramètres des fonctions gaussiennes, ont été exploités, *i.e.* les aires des bandes d'absorption.

II.3.4 Les aires totales et les aires réduites

Les aires des bandes d'absorption des spectres lissés, découpés et normés, ont également été calculées. Les programmes de ces calculs ont été rédigés sous OriginC. L'équation II.10 présente le calcul de l'aire de Riemann, A de la bande d'absorption entre λ_0 et λ_f.

$$A = \int_{\lambda_0}^{\lambda_f} R(\lambda_i)\, d\lambda \tag{II.10}$$

La figure II.33 présente une série de spectres d'un même échantillon (tailles de grains identiques) à différentes températures. Les courbes représentatives des spectres sont concourantes en deux points, appelés points d'ancrage. L'aire située entre les spectres et une ligne de base reliant les deux points d'ancrage est définie comme l'aire réduite. La position des points d'ancrage peut légèrement changer d'un échantillon à l'autre. Ces aires réduites sont présentes pour les bandes à 1,30 et à 1,50 μm. Pour la bande à

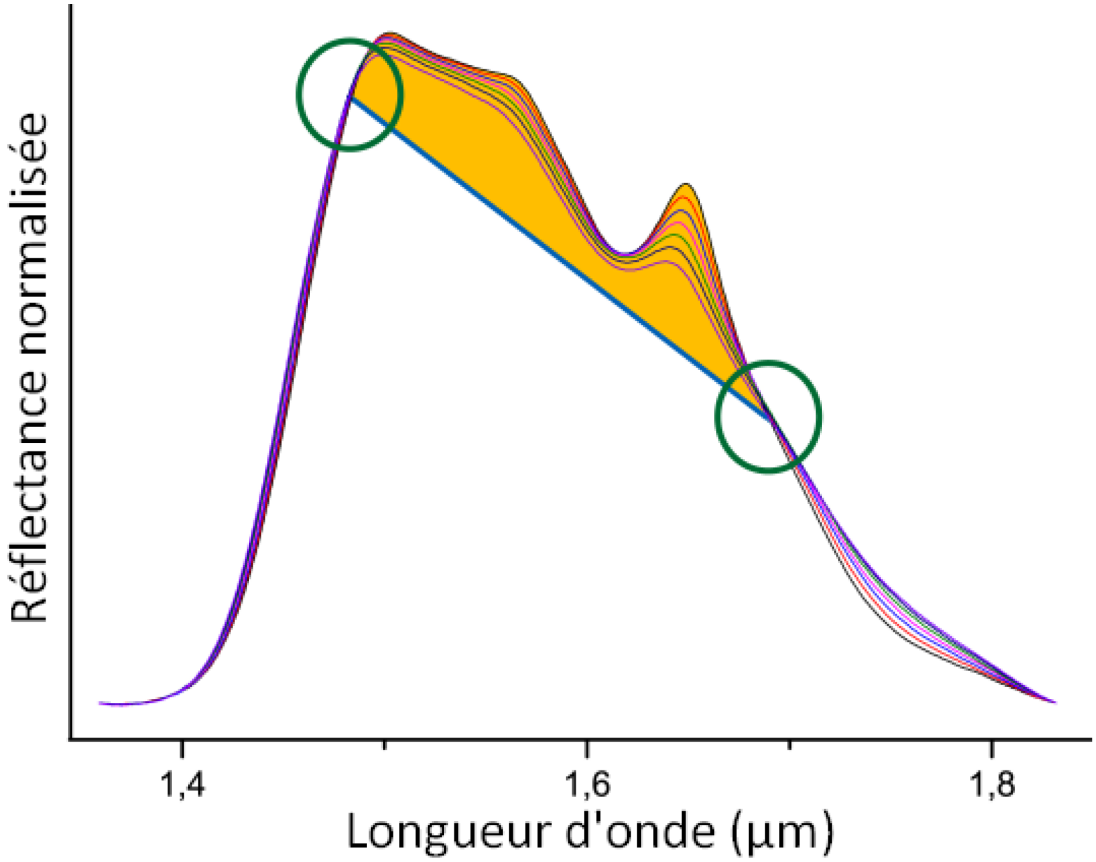


FIGURE II.33 – Schéma représentatif de l'aire réduite dessinée en orange, délimitée entre des spectres (différentes température, taille de grains constante) et une nouvelle ligne de base tracée entre les deux points d'ancrage.

1,30 μm, les points d'ancrage sont 1,160 μm et 1,345 μm et pour la bande à 1,50 μm, 1,359 μm et 1,832 μm.

Ce chapitre a permis de présenter le matériel et les techniques expérimentales utilisés pour acquérir les données spectrales de l'étude. Après un bref rappel des principes physiques de la spectroscopie infrarouge, le spectromètre infrarouge à transformée de Fourier du laboratoire et son logiciel d'utilisation ont été décrits. Finalement, les différentes méthodes de traitements numériques ont été détaillées. Le chapitre suivant présente les données expérimentales acquises sur des échantillons de glace d'eau pure : le protocole de synthèse et de chargement, l'acquisition des données et les résultats des traitements numériques.

Chapitre III

La glace d'eau pure

L'étude de l'eau pure a été réalisée sur plusieurs mois. Des spectres d'eau pure ont été acquis à différentes tailles de grains et températures. Ces acquisitions expérimentales vont permettre d'élaborer une loi de comportement de la signature spectrale de l'eau avec la température et la taille de grains. Le matériel expérimental et les appareillages présentés dans le chapitre précédent ont permis l'acquisition des données expérimentales décrites dans la première partie de ce chapitre. De même, les différentes méthodes de traitement de données exposées dans la section II.3, ont été utilisé sur les spectres expérimentaux de glace d'eau pure. Les résultats sont détaillés et discutés dans la seconde et dernière partie de ce chapitre. Les résultats obtenus avec les calculs d'aires totales et d'aires réduites sont également soumis à la procédure de traitement numérique. Les lois de dépendance en taille de grains et en température obtenues sont aussi présentées dans la dernière partie.

III.1 Le protocole expérimental

Cette section décrit le protocole expérimental mis en place durant cette étude pour analyser des échantillons de glace d'eau pure. Elle se découpe en deux parties : la synthèse et le chargement des échantillons puis, l'acquisition des données spectrales.

III.1.1 Synthèse et chargement

Les vingt-quatre échantillons étudiés dans ce chapitre sont constitués d'une multitude de grains de glace d'eau pure. Les échantillons ont été produits de deux manières différentes : i) soit à partir d'eau liquide condensée sur une plaque de métal (au dessus d'un bain d'azote liquide), ou gelée lentement dans la chambre froide (environ 260 K), ii) soit à partir de vapeur d'eau condensée sur une surface en métal froide (refroidie à l'azote liquide). Le protocole de tamisage des grains de glace a été mis en place avec la collaboration d'E. Le Menn et d'O. Bollengier : de l'eau liquide est gelée dans la chambre froide, le glaçon formé, est broyé plus ou moins finement. Les grains obtenus sont tamisés, triés de manière à contraindre au maximum le paramètre taille de grains. Les échantillons produits sont analysés sur la journée. Le premier chargement s'effectue rapidement après le tamisage mais le reste des échantillons est stocké dans la chambre froide sous atmosphère sèche, en attendant leur chargement pour une autre analyse. Une dizaine d'expériences dont les échantillons provenaient de la solidification de l'eau, a été tamisée. Pour les quatorze autres expériences, les grains de glace n'ont pas été tamisés, mais leur taille a été calculée à partir des expériences tamisées, voir table III.1. Ces tailles de grains ont été estimées à partir des informations spectrales des échantillons tamisés avec la méthode de Nolin et Dozier (2000). Dans cet article, les auteurs constatent que l'aire normalisée de la bande d'absorption à 1,03 μm a une dépendance

en racine avec la taille de grains. Aussi, le calcul des aires des bandes d'absorption des échantillons tamisés a permis, par inversion, de déduire les tailles de grains des autres échantillons. Ces résultats ont été utilisés avec précaution en prennant en compte une marge d'erreur importante. Les tailles de grains des échantillons tamisés sont mieux contraintes mais leur dispersion est assez étendue ($\pm$ 100 μm).

Le chargement du cryostat est réalisé à froid. L'ensemble du matériel, cryostat, pompe à vide, pompe à azote, réservoir d'azote et débimètre, sont installés sur un chariot et transportés à l'intérieur de la chambre froide. L'échantillon est chargé dans le cryostat le plus rapidement possible de manière à limiter la condensation de glace amorphe sur l'échantillon. Le vide est supprimé à l'ouverture du cryostat, et remis dès le chargement accompli toujours pour la même raison, *i.e.*, pour limiter le dépôt de glace amorphe sur la glace cristalline. L'ensemble du matériel est ensuite sorti de la chambre froide puis installé sous le spectromètre pour l'analyse. Chaque échantillon est analysé sur une gamme de température de 80 à 180 K, tous les 10 K, sous un vide primaire de l'ordre du millième de bar. Quelques minutes sont nécessaires pour assurer une homogénéité thermique dans l'échantillon à chaque palier de température. Pour quelques expériences, la mesure de température a été perturbée par un dysfonctionnement technique de l'appareil de mesure, des corrections, non détaillées ici, ont été appliquées *a posteriori*.

Malgré nos précautions, quelques échantillons ont été pollués par la condensation de glace amorphe lors du chargement. En effet, la température du cryostat à son ouverture dans la chambre froide est inférieure à 130 K voire 110 K. Lorsque le chargement est rapide, l'humidité ambiante peut alors se transformer en glace amorphe sur l'échantillon.

TABLE III.1 – Description des données expérimentales

Référence expérimentale	Nombre de spectres acquis	Domaine de température T (K)	σT (K)	Taille de grains D (μm)	σD (μm)	Type d'échantillon
17032009GI	11	80-180	1	280	20	Givre
17032009GL	11	80-180	1	1020	70	Glace
09042009	11	80-180	1	690	50	Givre
10042009GI	11	80-180	1	760	90	Givre
10042009GL	11	80-180	1	770	70	Glace
14042009GI	11	80-180	1	680	40	Givre
14042009GL	11	80-180	1	190	30	Glace
15042009GL1	11	80-180	1	590	30	Glace
15042009GI1	11	80-180	1	610	60	Givre
15042009GL2	11	80-180	1	560	20	Glace
15042009GI2	11	80-180	1	540	50	Givre
16042009GI	11	80-180	1	690	100	Givre
16042009GL	11	80-180	1	270	40	Glace
24042009	6	80-180	1	480	40	Glace
09022010	8	80-150	1	270	30	Glace tamisée
17022010	10	75-200	7 [a]	390	40	Glace tamisée
19022010	8	75-170	7 [a]	270	30	Glace tamisée
23022010	10	75-200	7 [a]	80	10	Glace tamisée
24022010	4	80-180	7 [a]	640	60	Glace tamisée
26022010	20	80-200	7 [a]	210	25	Glace tamisée
12042010	12	75-180	1	790	70	Glace tamisée
14042010	25	80-190	1	640	60	Glace tamisée

a. Mauvaise calibration de l'ITC

III.1.2 Sélection des données

Les spectres des échantillons de glace d'eau pure à l'échelle macroscopique ont été acquis avec le spectromètre à transformée de Fourier avec un background d'or rugueux, l'Infragold©. Cette partie est partagée en deux sections. La première explique la sélection des données, effectuée *a posteriori* des expériences, et la deuxième commente les bandes d'absorption qui ont été choisies pour l'étude.

Les expériences dont les grains n'ont pas été triés par tamisage ont permis d'obtenir 213 spectres. Par la suite, 316 spectres ont été réalisés sur des échantillons tamisés. Parmi l'ensemble de ces données, une sélection a été effectuée de manière à garder les informations les plus pertinentes et à retirer les spectres éventuellement faussés par des erreurs de manipulation. La liste de ces expériences à l'échelle macroscopique sans tamisage avec leur nom (date d'acquisition des spectres suivi de GL pour glace et GI pour givre (grains plus fins)), le numéro des spectres associé à la température et la pression d'acquisition, ainsi que les échantillons tamisés, triés par leur nom (date d'acquisition, une expérience correspondant à une taille de grains) dont le numéro des spectres est associé à une température et une pression d'acquisition est répertoriée en annexe A.

Pour les quatorze expériences dont les grains n'étaient pas tamisés, la température du cryostat approchait 200 K lors du chargement. Ainsi, lors de l'ouverture de la pompe à vide, l'échantillon, à peine chargé, était susceptible de subir une légère sublimation. Plusieurs spectres (une quarantaine) dont les températures d'analyses étaient proches ou supérieures à la température de sublimation de la glace d'eau, ont été retirés de l'analyse pour limiter l'insertion de données erronées. Pour éviter ce phénomène, le chargement des échantillons tamisés a été réalisé à des températures nettement plus basses qui s'approchaient de 100 K (maximum 130 K). Ainsi, ces échantillons n'étaient plus soumis à

la sublimation lors de la fermeture du cryostat. Cependant, en procédant ainsi, un dépôt de glace amorphe pouvait se déposer à la surface des échantillons. L'air de la chambre froide est asséché mais pas suffisamment pour limiter la condensation de glace amorphe sur la glace cristalline. Ce problème n'a pas été repéré immédiatement, les dépôts étant ténus, ou de nature suffisamment proche de celle des échantillons, pour être difficilement détectables sur le domaine spectral étudié en détail (1 à 2,5 μm). Cependant, les conséquences de ces dépôts étaient suffisamment importantes pour perturber les résultats des traitements numériques. Une observation déterminante a permis d'identifier au moins une partie de ce dépôt comme étant probablement de la glace amorphe. En effet, la réflexion du pic de Fresnel près de 3,1 μm est faible et large pour des glaces amorphes et cristallines chaudes (Wood et Roux, 1982; Warren, 1984; Hagen et al., 1981; Hansen et McCord, 2004) et, présente une structure en trois pics avec un pic central marquée pour les glaces cristallines froides (Bergren et al., 1978; Bertie et al., 1969; Hagen et al., 1981; Hansen et McCord, 2004). La figure III.1 présente les variations de la forme du pic de Fresnel des signatures spectrales des glaces d'eau cristalline et amorphe. Les fortes variations morphologiques du pic lié à la réflexion de Fresnel aux environs de 3,1 μm, observées sur les spectres expérimentaux, sont liées à la présence de glace amorphe à la surface des échantillons. De plus, une transition de phase (glace amorphe vers glace cristalline cubique) est observée grâce à ce même pic à une température caractéristique autour de 140 K (Kouchi et al., 1994; Hansen et McCord, 2004; Mastrapa et al., 2008). A l'inverse de la glace amorphe, la glace cristalline cubique présente en proche infrarouge une signature spectrale presque identique à celle de la glace cristalline hexagonale (Mastrapa et al., 2008). A partir de l'observation qualitative du pic de réflectance à 3,1 μm, une liste des chargements faussés par le dépôt de glace amorphe a pu être établie. Ce problème concerne 9 chargements analysés pour un total de 179 spectres.

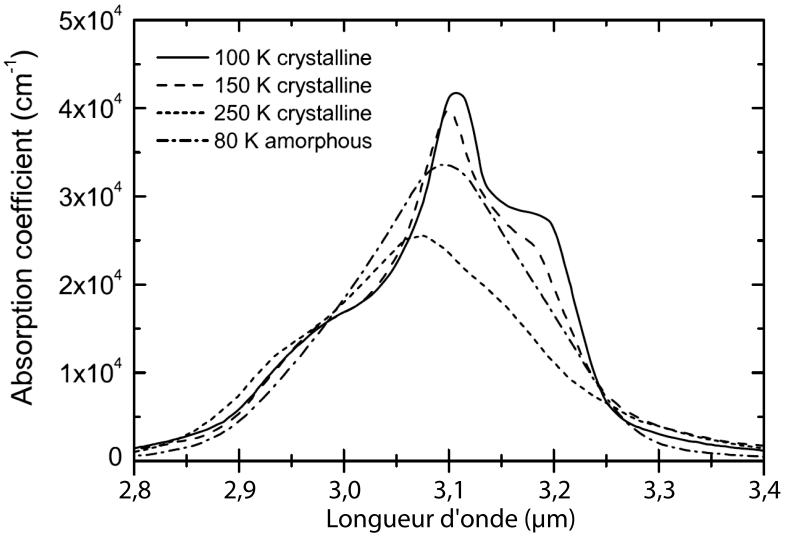


FIGURE III.1 – Spectres d'absorption de la glace d'eau entre 2,8 et 3,1 μm. Trois des courbes présentés sont de la glace d'eau cristalline à 100 K (Bertie et al., 1969), à 150 K (Bergren et al., 1978) et à 270 K (Warren, 1984), respectivement ligne pleine, tirets, et petits tirets. La quatrième courbe (points-tirets) représente l'absorption de la glace d'eau amorphe à 80 K (Wood et Roux, 1982).

De plus, les spectres acquis sur des échantillons identiques en température et en taille de grains ont été enlevés du traitement de manière à ne garder qu'un exemplaire de chaque donnée. En effet, le traitement numérique appliqué sur les spectres ne doit pas être influencé par un éventuel « poids virtuel » qui provoquerait des erreurs dans les résultats. Une cinquantaine de spectres est donc encore enlevée.

Enfin, les spectres des échantillons dont les tailles de grains sont trop importantes et saturent les bandes d'absorption, (Nolin et Dozier, 2000; Hansen et McCord, 2004), ne sont également pas pris en compte. En effet, plusieurs paramètres (profondeurs ou largeur de bande par exemple) seraient communs à plusieurs températures ou tailles de grains à cause de la saturation. L'obtention des lois de comportement est donc limitée à des tailles de grains inférieures à 700 μm.

Au final, 149 spectres sont issus d'échantillons non tamisés et 94 d'échantillons ta-

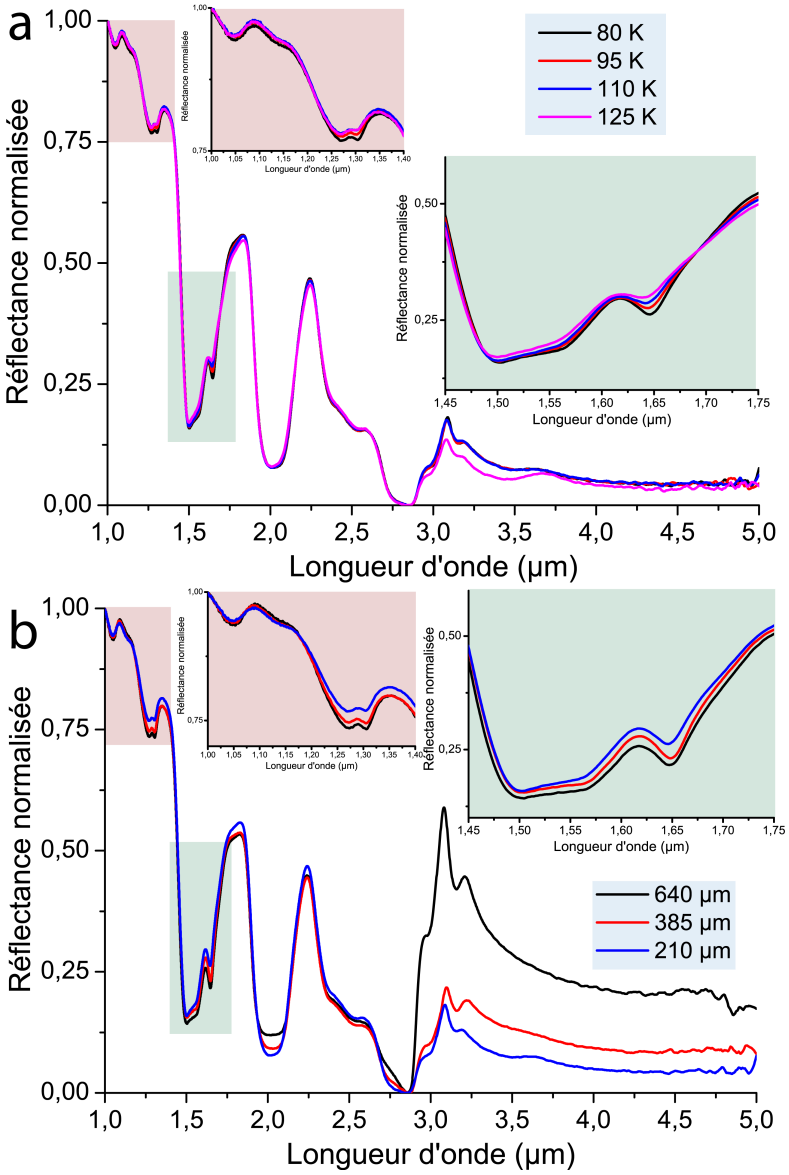


FIGURE III.2 – a) Spectres d'un échantillon de glace d'eau dont la taille moyenne des grains est 210 μm à différentes températures. b) Spectres de différents échantillons de glace d'eau, à différentes tailles de grains, à température constante (80 K).

misés de glace d'eau. 47 spectres parmi les échantillons tamisés sont inclus dans un domaine de température entre 80 et 140 K, dans lequel, aucun échantillon, avec certitude, n'a été sublimé et possède une taille de grains bien contrainte et inférieure à 700 μm. La figure III.2 présente quelques spectres dont la taille de grains est constante et la température décroissante (III.2a) et, inversement, la température constante et la taille de grains décroissante (III.2b). Peu de spectres sont présentés pour plus de clareté. L'ensemble de ces 47 spectres a permis d'établir une loi de comportement de la signature spectrale de la glace d'eau en fonction de la température et de la taille de grains. Le reste des spectres a permis de valider la loi.

III.1.3 Choix des caractéristiques spectrales étudiées

Toutes les bandes d'absorption de la glace d'eau n'ont pas été utilisées pour établir la loi de dépendance en température et en taille de grains. L'étude s'est concentrée dans un premier temps sur les aires des bandes à 1,05 μm et à 1,3 μm de manière à accomplir la méthode de Nolin et Dozier (2000) pour estimer la taille de grains des échantillons non tamisés. La figure III.3 présente les bandes d'absorption étudiées dans ce chapitre. Par la suite, en observant les dépendances en température et en taille de grains de l'aire de Riemann de la bande à 1,5 μm, le choix de l'étude s'est porté vers cette large bande qui est également très visible sur les spectres naturels issus de VIMS. La bande à 1,3 μm est également exploitable sur certaines données VIMS. En revanche, la bande à 1,05 μm ne présente que peu de points (4 à 5) sur les spectres naturels (voir figure III.3). Ainsi, les lois élaborées concernent les bandes d'absorption à 1,3 et 1,5 μm. La bande à 2 μm sature tellement rapidement avec la taille de grains qu'elle n'a pas pu être utilisée pour l'étude.

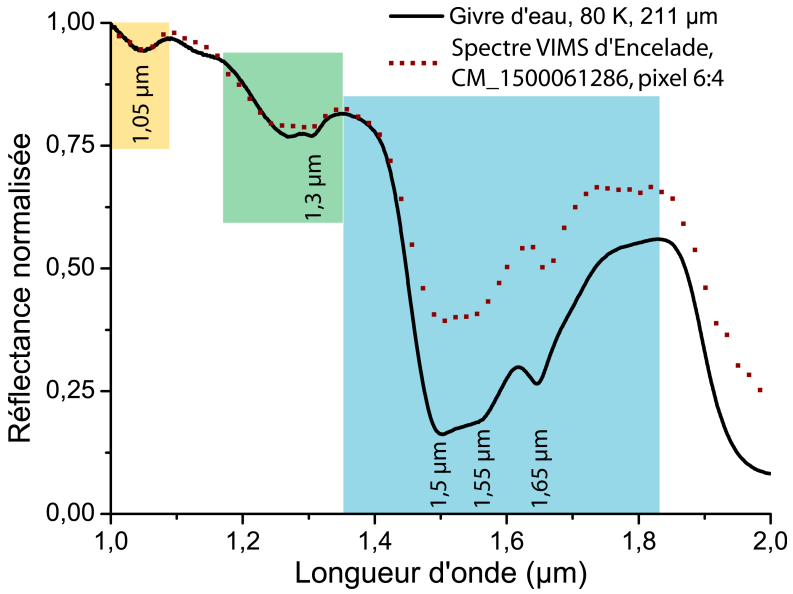


FIGURE III.3 – Spectre expérimental de glace d'eau pure normalisé à 1 μm, à 80 K et environ 211 μm, en noir. Les cadres de couleur mettent en évidence les zones étudiées. Les carrés rouges représentent un spectre VIMS de la surface d'Encelade entre 1 et 2 μm, CM_1500061286_1·cub, pixel 6 :4.

Cette section a décrit les protocoles expérimentaux de synthèse et de chargement des échantillons de glace d'eau pure, puis a expliqué la nécessité d'une sélection des données et a présenté le choix des bandes d'absorption utilisées pour l'étude de l'influence de la température et de la taille de grains sur la signature spectrale de la glace d'eau. La section suivante expose les lois de dépendance des caractéristiques spectrales de la glace d'eau qui ont été élaborées et utilisées pour la suite de l'étude.

III.2 Influence de la température et de la taille de grains

La spectroscopie infrarouge d'absorption met en évidence les vibrations interatomiques. La variation de température, qui contracte ou dilate les liaisons interatomiques, va donc influencer de manière plus ou moins significative les différentes caractéristiques

des bandes d'absorption (position, profondeur, largeur, aire ...). De même, la taille d'un grain parmi d'autres grains va modifier le chemin optique parcouru par le rayonnement et, par conséquent, la forme des bandes d'absorption.

III.2.1 Etudes précédentes

La dépendance en température de la signature spectrale de la glace d'eau a été étudiée à diverses reprises. Kieffer et Smythe (1974) ont remarqué la forte dépendance en température de la bande d'absorption à 1,65 μm. Un an plus tard, Fink et Larson (1975) ont également étudié cette bande mais ont utilisé le rapport de l'aire de la bande à 1,65 μm sur celle de la bande à 1,50 μm. Ces deux études expérimentales ont mené à la même conclusion de dépendance du spectre de la glace d'eau avec la température. Des années plus tard, des modèles ont été élaborés pour caractériser de manière plus précise la dépendance en température de ces spectres. Ces modèles utilisent des constantes optiques obtenues à partir de spectres expérimentaux en transmission (Grundy et Schmitt, 1998; Mastrapa et al., 2008, 2009). Ces spectres modélisés ont par la suite été comparés aux spectres naturels des surfaces planétaires de manière à obtenir des informations sur leur température de surface (Grundy et al., 1999). D'autres études expérimentales ont été publiées grâce à Leto et al. (2005) qui, à son tour, confirme que la bande d'absorption à 1,65 μm du spectre de glace d'eau dépend de manière assez significative de la température, ce qui doit permettre de l'utiliser pour déterminer la température à la surface des planètes. Finalement, Mastrapa et al. (2008) publient des données détaillées sur les positions des bandes d'absorption autour de 1,5 μm en fonction de la température. Jusqu'à présent aucune étude ne met clairement en évidence une carte de distribution en température obtenue à partir de spectres en proche infrarouge.

La dépendance en taille de grains est également étudiée. Kieffer (1970) devine que la signature infrarouge de la glace d'eau dépend de la taille de grains mais reste très vague sur ce point. De même, Clark (1981b) et Clark et al. (1983) étudient la dépendance en taille de grains du spectre de glace d'eau mais ne donnent aucune loi précise. Dix ans plus tard, Nolin et Dozier (1993) proposent un modèle de la dépendance en taille de grains de la signature IR de la glace d'eau et cinq ans après, Painter et al. (1998) utilise l'imagerie hyperspectrale pour étudier la taille de grains de la neige sur Terre. Par la suite, Nolin et Dozier (2000) établissent une loi entre l'aire normalisée de la bande à 1,05 μm et la racine de la taille de grains. Cette loi est établie à partir des données hyperspectrales. Cette étude porte plus particulièrement sur la dépendance de l'aire de la bande à 1,05 μm. Finalement, Jaumann et al. (2008) tracent une carte de distribution de la taille de grains d'Encelade à partir du modèle de dépendance du spectre de la glace d'eau avec la taille de grains de Hansen et McCord (2004). A l'heure actuelle, aucune étude à notre connaissance n'a étudié les influences respectives de la température et de la taille de grains sur la signature proche infrarouge de la glace d'eau.

Dans notre étude, l'influence simultanée de la température et de la taille de grains sur la signature spectrale de la glace d'eau est étudiée pour élaborer une loi de dépendance. Cette loi est utilisée pour réaliser des cartes de distribution de la température et de taille de grains du pôle sud d'Encelade, (voir section V.1).

III.2.2 Elaboration de la loi

Les triplets (Critère spectral, Température (T), taille de grains (D)) obtenus expérimentalement sont utilisés dans un programme d'inversion des moindres carrés (lissage.f, voir annexe C), écrit sous fortran 77, pour déterminer les coefficients d'une loi de dé-

pendance de ces critères en fonction de T et D. L'équation III.1 est la loi utilisée pour décrire la dépendance des critères avec T et D.

$$X_k^i = X_{0,k}^i + a_{T,k}^i \times T + a_{D,k}^i \times \sqrt{D} \tag{III.1}$$

X est un critère, i (centre, largeur, profondeur ou aire de la gaussienne ou de la bande d'absorption) d'une gaussienne (ou d'une bande d'absorption), k (quatre possibles dans le domaine spectral étudié, autour de 1,5 μm), T, la température en K, D, la taille de grains en μm, $X_{0,k}^i$, un paramètre de référence, en μm, lié au critère, i, de la $k^{ème}$ gaussienne (ou bande d'absorption) et $a_{T,k}^i$, et $a_{D,k}^i$, des paramètres liés, respectivement, à la dépendance en température, en K^{-1}, et en taille de grains,en $\mu m^{-1/2}$ de ce même critère.

La dépendance en racine de la taille de grains est naturelle. En effet, il est difficile de croire que les critères peuvent augmenter ou diminuer indéfiniment lorsque la taille de grains est très importante ou très faible. Ainsi, pour illustrer la saturation lors d'une évolution trop importante de la taille de grains, la dépendance en racine a été imposée.

L'inversion des moindres carrés du programme « lissage.f » permet de déterminer les paramètres $X_{0,k}^i$, $a_{T,k}^i$, et $a_{D,k}^i$ pour chaque critère, i, de chaque gaussienne, k selon une grille de calcul sur T et D. En entrée du programme, un fichier contenant les informations de température, taille de grains et critères retenus est à construire à partir du programme MGM ou du logiciel OriginPro©. Ces derniers permettent de calculer les critères spectraux des gaussiennes (centre, largeur, profondeur, aire) ou des bandes d'absorption (aire et aire réduite), voir section II.3.

III.2.3 Dépendance des gaussiennes

La loi a été utilisée sur les caractéristiques des gaussiennes calculées avec le programme MGM, d'une part, et le logiciel OriginPro©, d'autre part. Cette partie décrit, d'abord, les résultats obtenus sur les différents critères de fonctions gaussiennes, puis compare et discute ces résultats.

Le Modèle Gaussien Modifié

En sortie du MGM, l'ensemble des critères (centre, largeur et profondeur) des quatre gaussiennes et leurs température et taille de grains associées sont rangés dans un tableau de données. Ces données constituent le fichier d'entrée du programme d'inversion des moindres carrés. A la sortie de ce programme, les valeurs des coefficients $X^i_{0,k}$, $a^i_{T,k}$, et $a^i_{D,k}$ pour chaque critère i et pour chaque gaussienne k permettent d'obtenir un loi de dépendance de chaque critère en fonction de T et D. Le tableau III.2 rassemble ces paramètres, déterminés à partir des spectres expérimentaux.

TABLE III.2 – Valeurs des coefficients $X^i_{0,k}$, $a^i_{T,k}$, et $a^i_{D,k}$ de chaque critère de chaque gaussienne

	X_0			a_T			a_D		
Gaussienne	Centre (cm^{-1})	Largeur (cm^{-1})	Profondeur	Centre ($cm^{-1}.K^{-1}$)	Largeur ($cm^{-1}.K^{-1}$)	Profondeur (K^{-1})	Centre ($cm^{-1}.\mu m^{-1/2}$)	Largeur ($cm^{-1}.\mu m^{-1/2}$)	Profondeur ($\mu m^{-1/2}$)
1	6583,83	144,98	-0,175	0,41205	0,15405	0,00084	2,95556	7,30514	-0,04474
2	6373,16	158,41	-0,214	0,48649	0,32149	0,00082	-0,30409	3,23935	-0,02886
3	6013,95	109,95	-0,522	0,30859	0,03577	0,00301	0,87649	0,37690	-0,01351
4	6422,82	632,52	0,0316	0,26333	0,24272	0,00079	-11,33014	13,20234	-0,05220

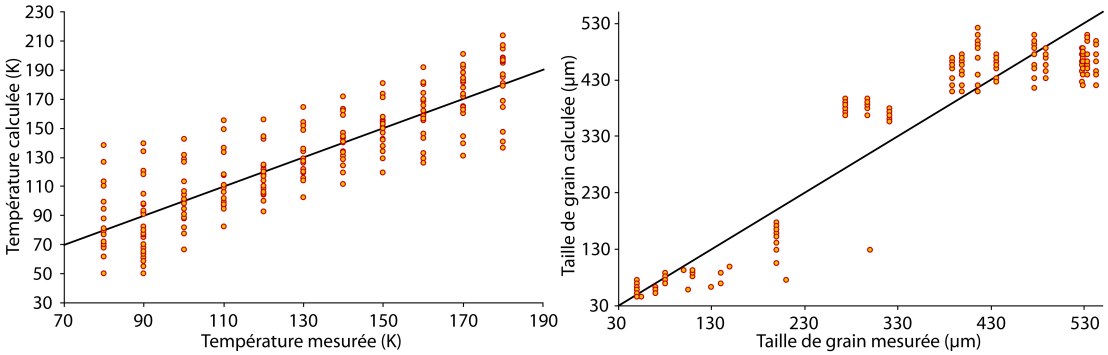


FIGURE III.4 – A gauche, évolution de la température calculée en fonction de la température mesurée. A droite, évolution de la taille de grains calculée en fonction de la taille de grains mesurée. Les droites noires représentent la fonction $y = x$.

Ces paramètres sont ensuite utilisés pour faire un calcul direct de la taille de grains et de la température à partir des caractéristiques spectrales. Un programme élaboré en fortran 77, voir annexe C, permet de calculer des températures et des tailles de grains à partir des critères des gaussiennes (position, largeur, profondeur) d'un spectre dont les caractéristiques (température et taille de grains) seraient inconnues.

La figure III.4 montre les résultats obtenus avec les paramètres, $X^i_{0,k}$, $a^i_{T,k}$, et $a^i_{D,k}$, des 12 critères calculés par le MGM (centres, profondeurs et largeurs pour les 4 gaussiennes de la bande à 1,5 μm).

La moyenne et l'écart type des différences entre les valeurs mesurées et celles calculées avec les nouveaux paramètres pour T et D sont calculées avec ces résultats. Le tableau III.3 contient cette moyenne et son écart-type associé.

TABLE III.3 – Moyenne et écart type des différences entre les valeurs mesurées et calculées

	$T_{th} - T_g$ (K)	$D_{th} - D_g$ (μm)
Moyenne	$6,60.10^{-2}$	$2,77$
Ecart type	$19,79$	$59,14$

La température et la taille de grains semblent, en moyenne, être retrouvées par un calcul théorique à partir des paramètres $X^i_{0,k}$, $a^i_{T,k}$, et $a^i_{D,k}$ mais les écart-types sont importants. La procédure fonctionne pour la plupart des spectres, cependant, quelques spectres montrent un résultat peu satisfaisant, ce que traduit l'écart-type.

Le logiciel OriginPro©

Les critères de gaussiennes obtenus avec Origin Pro© ont été utilisés avec le programme « lissage.f » écrit en fortran 77, qui permet de calculer les paramètres, $X^i_{0,k}$, $a^i_{T,k}$, et $a^i_{D,k}$, de la loi III.1 développée dans la section III.2.2. Le tableau III.4 rassemble ces paramètres, déterminés à partir des spectres expérimentaux. Les positions de référence des centres et les largeurs de référence ont été converties en nombre d'onde pour comparer avec les résultats précédents mais les calculs ont été effectués en longueurs d'onde.

TABLE III.4 – Valeurs des coefficients $X^i_{0,k}$, $a^i_{T,k}$, et $a^i_{D,k}$ de chaque critère de chaque gaussienne

	X_0			a_T			a_D		
Gaussienne	Centre (cm^{-1})	Largeur (cm^{-1})	Profondeur	Centre ($cm^{-1}.K^{-1}$)	Largeur ($cm^{-1}.K^{-1}$)	Profondeur (K^{-1})	Centre ($cm^{-1}.\mu m^{-1/2}$)	Largeur ($cm^{-1}.\mu m^{-1/2}$)	Profondeur ($\mu m^{-1/2}$)
1	6594,67	739,61	-8,03.10^{-1}	-2,21.10^{-4}	-7,56.10^{-5}	2,37.10^{-3}	-8,52.10^{-4}	-3,61.10^{-4}	7,56.10^{-3}
2	6272,29	400,16	-4,81.10^{-1}	-3,41.10^{-4}	2,51.10^{-4}	6,51.10^{-4}	-8,52.10^{-4}	1,47.10^{-3}	-3,52.10^{-3}
3	6050,24	267,57	-4,81.10^{-1}	-1,01.10^{-4}	7,85.10^{-6}	1,12.10^{-3}	2,33.10^{-4}	-3,44.10^{-4}	1,66.10^{-3}
4	6041,40	654,28	-2,05.10^{-1}	-1,23.10^{-4}	4,26.10^{-4}	5,90.10^{-4}	2,84.10^{-4}	-1,52.10^{-4}	-1,42.10^{-3}

Ces paramètres sont également utilisés pour faire un calcul direct de la taille de grains et de la température à partir des caractéristiques spectrales. Le même programme,

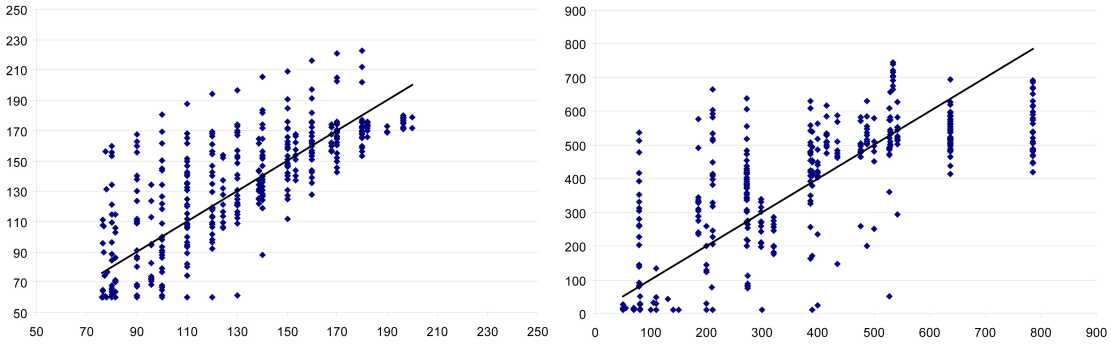


FIGURE III.5 – A gauche, évolution de la température calculée en fonction de la température mesurée. A droite, évolution de la taille de grains calculée en fonction de la taille de grains mesurée. Les droites noires représentent la fonction $y = x$.

voir annexe C, qui permet de calculer des températures et des tailles de grains à partir des critères des gaussiennes (position, largeur, profondeur) d'un spectre dont les caractéristiques (température et taille de grains) seraient inconnues est utilisé.

La figure III.5 montre les résultats obtenus avec les nouveaux paramètres, issus des 12 critères calculés par Origin Pro© (centres, profondeurs et largeurs pour les 4 gaussiennes de la bande à 1,5 μm).

Le tableau III.5 contient les résultats du calcul de la moyenne et de l'écart type des différences entre les valeurs mesurées et celles calculées avec les nouveaux paramètres pour T et D.

TABLE III.5 – Moyenne et écart type des différences entre les valeurs mesurées et calculées

	$T_{th} - T_g$ (K)	$D_{th} - D_g$ (μm)
Moyenne	$21,13$	$395,44$
Ecart type	$14,09$	$218,91$

Les résultats obtenus avec ce logiciel semblent beaucoup moins bons pour la taille de grains que ceux trouvés avec le MGM alors que ce dernier montrait parfois un mauvais

ajustement de spectre. Les calculs théoriques de la température semblent en revanche plus homogènes selon l'écart-type.

Comparaison et discussion

Le programme MGM et le logiciel OriginPro© fournissent des paramètres (centre, largeur, profondeur) des fonctions gaussiennes. Le traitement numérique de ces paramètres avec la loi élaborée dans ce travail donne des résultats différents. Cette partie vise à comparer ces résultats, à expliquer la sensibilité de l'ajustement spectral par des fonctions gaussiennes et à expliquer l'origine des mauvais ajustements.

Comparaison entre le MGM et le logiciel OriginPro©. La figure III.6 montre la différence des résultats des ajustements réalisés avec le MGM et Origin Pro© pour la gaussienne représentative de la bande à 1,5 μm. Globalement, les positions de gaussiennes semblent plus précises avec le MGM mais les profondeurs sont plus homogènes avec Origin Pro©.

Les ajustements de signatures spectrales par sommation de fonctions gaussiennes (MGM et Origin Pro©) produisent des résultats similaires. Malheureusement, les ajustements ne sont pas toujours excellents.

L'ajustement. L'ajustement est très fortement sensible aux paramètres d'entrée contenus dans le fichier « paramètres » dans le MGM. Par souci de cohérence, un seul fichier « paramètre » a été utilisé pour l'ensemble des spectres acquis sur des échantillons de glace d'eau. Malheureusement, les changements dans les spectres sont parfois trop importants pour un même fichier « paramètres ». Certains ajustements de spectres ne sont donc pas optimaux. La figure III.7 montre le résultat d'un ajustement de qualité mé-

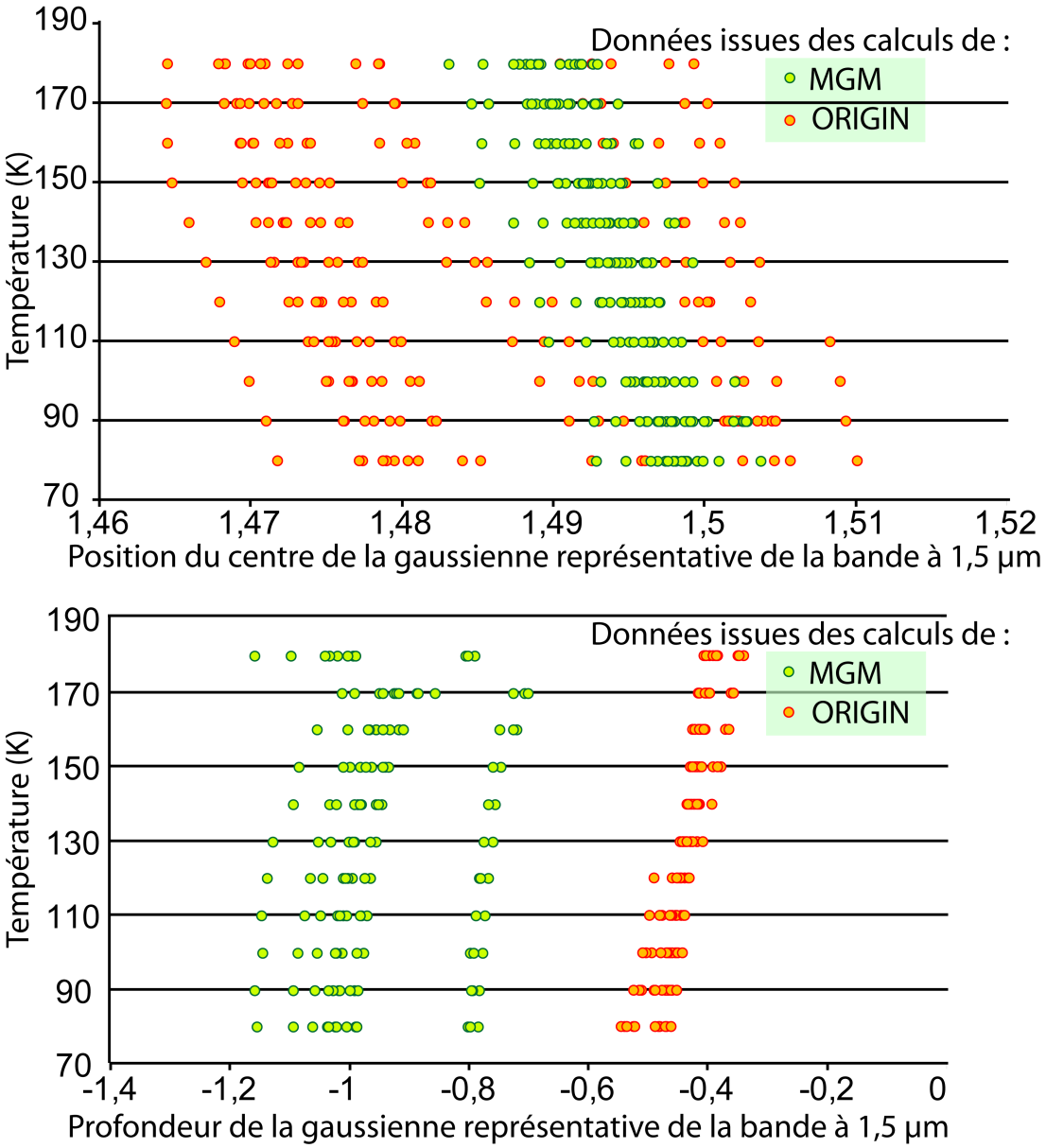


FIGURE III.6 – En haut, évolution de la position de la gaussienne représentative de la bande à 1,5 μm en fonction de la température. En bas, évolution de la profondeur de la gaussienne représentative de la bande à 1,5 μm en fonction de la température. Les points orange correspondent aux résultats issus des ajustements avec Origin Pro© et les points verts à ceux obtenus avec le MGM.

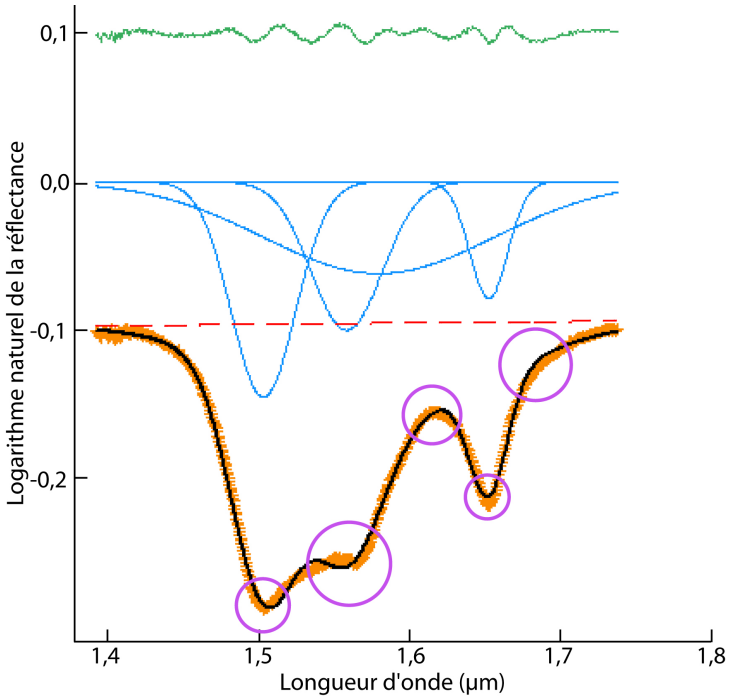


FIGURE III.7 – Graphique représentatif des résultats de l'ajustement du MGM. La courbe orange est le spectre expérimental à ajuster, la courbe noire est le résultat de l'ajustement, les courbes bleues sont les gaussiennes qui ont permis l'ajustement, la courbe rouge est le continuum et la courbe verte est le résidu. Les mauvais ajustements sont mis en évidence par des ronds mauves.

diocre d'un spectre d'un échantillon microscopique à 90 K et 50 μm. Les mauvais ajustements se situent aux creux et/ou aux sommets des bandes d'absorption. Ces parties sont entourées en mauves sur la figure III.7. Ces mauvais ajustements des spectres se retrouvent dans les calculs de température et de taille de grains, lors de l'inversion, par de fortes différences entre les calculs théoriques et les mesures expérimentales.

Les deux exemples qui suivent, montrent que si un spectre est moins bien ajusté, le calcul de la température et de la taille de grains qui en résulte est fortement affecté par l'erreur.

Prenons le cas d'un spectre expérimental à 200 μm et 90 K dont les valeurs de température et de taille de grains théoriques sont éloignées des mesures expérimentales (61 K, 150 μm). La courbe du spectre expérimental est représentée en rouge sur la figure III.8. La courbe issue du calcul du spectre à partir des valeurs (centres, largeurs et profondeurs) de sorties du MGM est tracée en bleue. La différence entre les deux spectres est due à un mauvais ajustement du MGM provoqué par les données du fichier « paramètres d'entrée » commune à l'ensemble des spectres des échantillons microscopiques. Le calcul effectué pour retrouver le spectre expérimental, $Spec(T, D, \nu)$, est le suivant :

$$Spec(T, D, \nu) = \exp \sum_{k=1}^{4} G_k(T, D, \nu) + continuum(\nu) \qquad \text{(III.2)}$$

La dernière courbe, en vert, est le spectre théorique calculé à partir des paramètres $X^i_{0,k}$, $a^i_{T,k}$, et $a^i_{D,k}$ du $i_{ème}$ critère de la $k_{ème}$ gaussienne, établis grâce aux spectres expérimentaux dans la section III.2.3.

La courbe verte, le spectre théorique, semble très éloigné de la mesure, ce qui explique que les valeurs de température et de taille de grains théoriques soient également très éloignées.

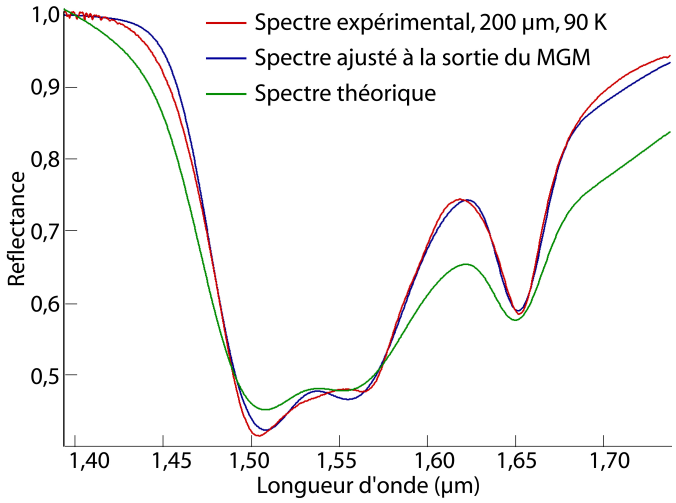


FIGURE III.8 – Graphique représentatif des résultats de l'ajustement du MGM. La courbe rouge est le spectre expérimental à ajuster, la courbe bleue est le résultat de l'ajustement et la courbe verte est issue d'un calcul théorique du spectre.

Prenons désormais, le cas d'un spectre expérimental à 140 K et 477 μm dont les valeurs de température et de taille de grains théoriques sont proches des valeurs mesurées (143,3 K, 474,1 μm). La courbe verte, figure III.9, est une meilleure représentation du spectre mesuré. La loi, proposée dans cette étude, est donc une bonne représentation du comportement des différents critères (centres, largeurs et profondeurs) en fonction de la température et de la taille de grains. En revanche, les paramètres de sortie du MGM (centre, largeur, profondeur), ou du logiciel OriginPro©, doivent être les meilleurs possibles pour obtenir une température et une taille de grains les plus proches possibles de la réalité, ce qui n'est pas toujours le cas.

Origine du mauvais ajustement. Les bandes d'absorption de la signature spectrale de la glace d'eau sont le résultat de transitions vibrationnelles et rotationnelles. Or, Sunshine et al. (1990) ont créé l'outil MGM pour ajuster au mieux les bandes d'absorption générées par les transitions électroniques du Fe^{2+} dans le pyroxène. Cet outil est géné-

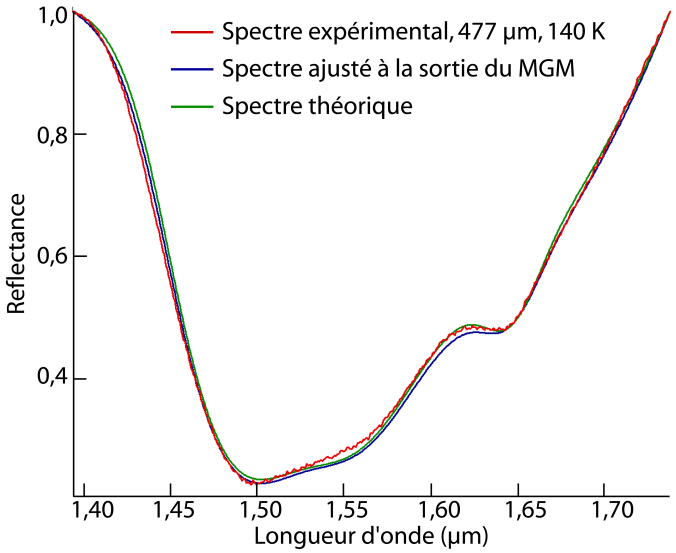


FIGURE III.9 – Graphique représentatif des résultats de l'ajustement du MGM. La courbe rouge est le spectre expérimental à ajuster, la courbe bleue est le résultat de l'ajustement et la courbe verte est issue d'un calcul théorique du spectre.

ralisable à toutes les bandes de transitions électroniques. Ainsi, il est fortement probable que cette méthode d'ajustement par sommation de gaussiennes ne soit pas applicable à nos échantillons en raison des processus physiques qui génèrent les bandes d'absorption dans la glace. L'ajout de fonctions gaussiennes pourrait être une solution mathématique acceptable pour mieux ajuster nos spectres mais ces courbes supplémentaires ne correspondraient pas à des processus physiques.

Ainsi, les deux méthodes d'ajustement de spectres par sommation de fonctions gaussiennes présentent des résultats similaires et donc des erreurs similaires. Aussi, d'autres critères ont été recherchés de manière à traduire la dépendance de la signature spectrale de la glace d'eau par une équation relative à la température et la taille de grains. Les recherches se sont tournées vers l'étude directe des données spectrales comme les aires de Riemann des bandes d'absorption et leur aires réduites, contrairement aux techniques plus élaborées d'ajustement spectral.

III.2.4 Dépendance des aires

Les recherches sur les différents critères des bandes d'absorption qui peuvent exister (centres, profondeurs, largeurs ...) ont amenés à l'étude des aires des bandes d'absorption des spectres plutôt qu'aux paramètres des gaussiennes. Cette partie se découpe en deux paragraphes, le premier traite de la dépendance des aires des bandes d'absorption en taille de grains et le deuxième, de la dépendance des aires réduites avec la température et la taille de grains.

Dépendance en taille de grains

Selon la loi de Beer-Lambert, l'absorption dans un milieu est proportionnelle à l'exponentielle du trajet parcouru dans ce milieu : cette relation se retrouve bien avec les surfaces des bandes d'absorption. Le calcul des aires (de Riemann) des bandes d'absorption à 1,03, à 1,30, à 1,5 et à 2 μm permet de constater les dépendances des aires en fonction de la température et de la taille de grains. Les figures III.10 et III.11 représentent l'évolution des aires des bandes d'absorption en fonction de la température et de la taille de grains. Ces aires ont été normalisées en divisant par une aire de référence de manière à pouvoir les comparer avec des aires calculées sur des spectres théoriques fournis par Sylvain Douté (Laboratoire de Planétologie de Grenoble), elles-mêmes divisées par une aire de référence d'un spectre théorique. Ces spectres ont été calculés à partir de constantes optiques déterminées sur des spectres expérimentaux réalisés à Grenoble. Les deux aires de référence ont été obtenues sur des spectres dont la température et la taille de grains sont proches. En normalisant les aires avec des aires de référence propres à chaque type d'expérience, des données comparables et similaires sont obtenues. Les aires semblent peu dépendantes de la température, jusqu'à 140 K,

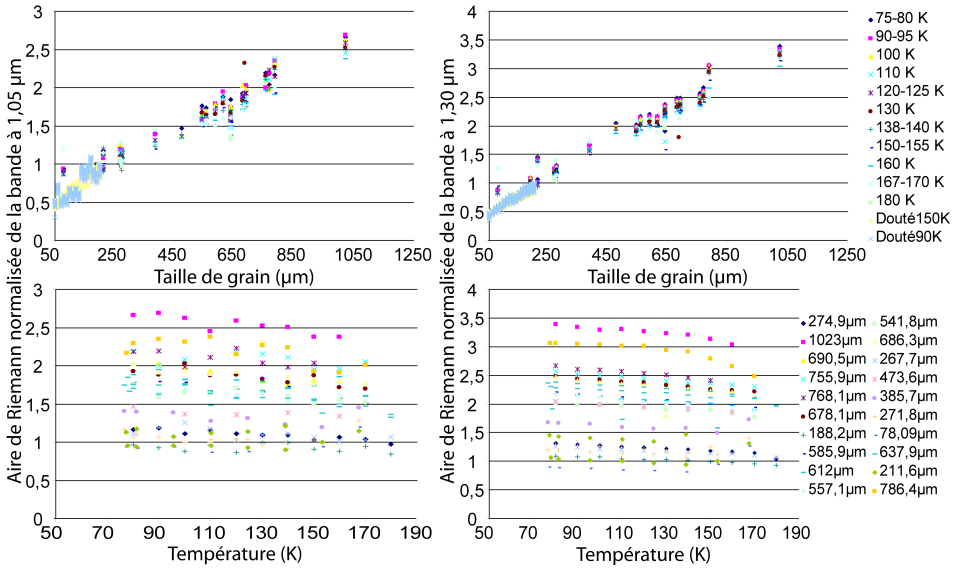


FIGURE III.10 – Evolution de l'aire de Riemann normalisée des bandes à 1,03 et 1,30 μm en fonction de la taille de grains (en haut) et de la température (en bas). Chaque couleur correspond à une taille de grains ou un domaine de température. Le calcul des aires des spectres de S. Douté est ajouté pour comparaison.

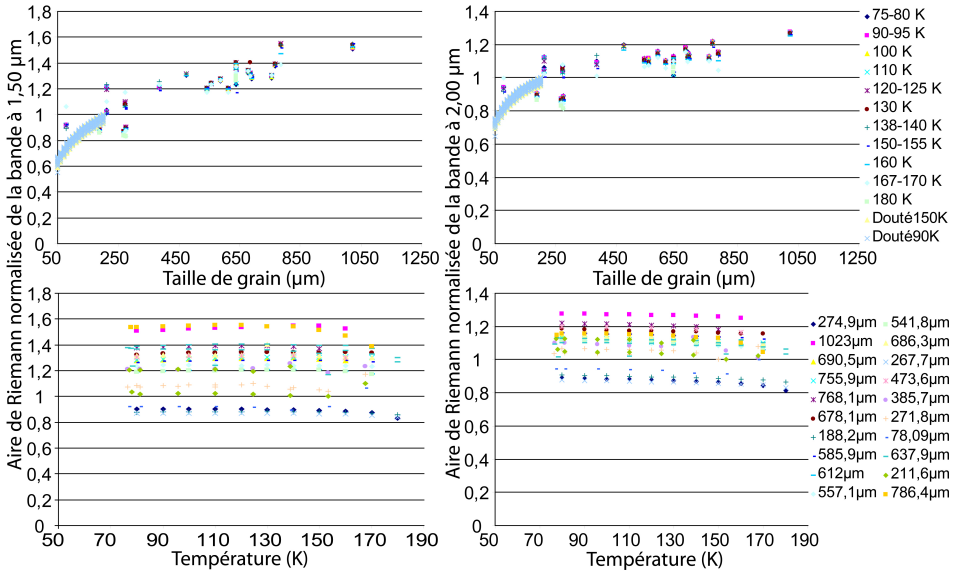


FIGURE III.11 – Evolution de l'aire de Riemann normalisée des bandes à 1,50 et 2 μm en fonction de la taille de grains (en haut) et de la température (en bas). Chaque couleur correspond à une taille de grains ou un domaine de température. Le calcul des aires des spectres de S. Douté sont ajoutés pour comparaison.

(figures III.10 et III.11 en bas), température à partir de laquelle les aires évoluent de manière non cohérente avec celle-ci. En revanche, elles paraissent plus ou moins dépendantes de la taille de grains. L'aire à 2 μm a une dépendance moins importante, car cette bande est large et profonde. Par conséquent, elle sature rapidement avec les grosses tailles de grains. Pour des tailles de grains inférieures à 700 μm, l'aire de la bande à 1,50 μm ne sature pas et peut être utilisée pour l'étude. Les bandes à 1,05 et 1,30 μm ne saturent pas dans le cadre de notre étude (pour des échantillons dont la taille est inférieure au millimètre).

L'observation des dépendances des aires à 1,05, 1,30 et 1,50 μm en taille de grains, une tendance linéaire est notée pour les grains dont la taille est supérieure à 200 μm et logarithmique pour une taille inférieure à 200 μm. Les équations III.3 et III.4 présentent les deux lois de dépendance en taille de grains des aires des bandes à 1,05, 1,30 et 1,50 μm. L'équation III.3 est valable pour des tailles de grains comprises entre 200 et 700 μm et des températures entre 77 et 140 K. L'équation III.4 est valable pour des tailles de grains comprises entre 10 et 200 μm, et des températures entre 90 et 150 K.

$$A^{Norm}(D) = a_D D + a_0 \tag{III.3}$$

$$A^{Norm}(D) = a'_D \ln D + a'_0 \tag{III.4}$$

avec A^{Norm}, D, a_0 et a'_0 en μm, a_D et a'_D sans dimension. La table III.6 présente les valeurs des coefficients obtenus par régression linéaire des données expérimentales représentées sur les figures III.10 et III.11.

TABLE III.6 – Valeurs des coefficients des équations de dépendance en taille de grains

Bande d'absorption	$a_0(\mu\text{m})$	a_D	a'_0 (μm)	a'_D
1,05 μm	4,72.10^{-1}	1,42.10^{-3}	-6,68.10^{-1}	2,86.10^{-1}
1,30 μm	2,56.10^{-1}	1,87.10^{-3}	-6,53.10^{-1}	2,87.10^{-1}
1,50 μm	6,87.10^{-1}	6,51.10^{-3}	-2,70.10^{-1}	2,31.10^{-1}

Dans l'objectif d'appliquer les lois de comportement des signatures spectrales en fonction de la température et de la taille de grains aux satellites de glace, il est nécessaire de considérer la résolution spectrale des instruments VIMS (Cassini) et NIMS (Galileo). Puisque leur résolution spectrale est très faible, les bandes à 1,3 et 1,5 μm seront privilégiées, laissant de côté la bande à 1,05 μm qui ne possèdent que peu de points d'analyse sur les spectres naturels et à 2 μm qui saturent rapidement sur nos échantillons. L'aire de la bande à 1,50 μm semble être la moins dépendante en température, figure III.11 en bas à gauche. Considérons donc l'aire de cette bande comme une référence dans la détermination de la taille de grains.

Dépendance en température

La dépendance en température ne semble pas évidente à déterminer. Aucun critère (centre, profondeur, largeur, aire de gaussienne ...) ne paraît suffisamment dépendant de la température et indépendant de la taille de grains pour établir une loi entre la signature spectrale de la glace d'eau et la température. Cependant, en superposant l'ensemble des spectres d'un même échantillon (taille de grains constante), deux points, dit d'ancrage, sont remarquables. La figure II.33 montre la position de ces points d'ancrage et met en évidence la présence d'une aire réduite qui semble dépendre fortement de la température et peu de la taille de grains. De plus, la position des points d'ancrage varie peu avec la

taille de grains. Ces aires réduites sont présentes pour les bandes à 1,30 et à 1,50 μm.

En suivant la procédure de traitement numérique décrite dans la section III.2.2, deux programmes de traitements numériques sont à utiliser. Le premier est le programme « lissage.f » qui permet de déterminer les paramètres X_0, a_T et a_D de chaque aire réduite des bandes d'absorption à 1,30 et 1,50 μm. La dépendance en température et en taille de grains de ces bandes d'absorption est toujours décrite par l'équation III.1. A l'issue de ce traitement, un triplet de paramètres est obtenu pour chacun des critères. Le tableau III.7 présente les valeurs calculées pour chaque critère.

TABLE III.7 – Valeurs des coefficients des équations de dépendance en température et en taille de grains

	Aire réduite normalisée de la bande à 1,3 μm	Aire réduite normalisée de la bande à 1,5 μm
X_0	1,9903	2,2631
a_T	$-1,0421.10^{-2}$	$-8,8553.10^{-3}$
a_D	$2,1956.10^{-3}$	$8,7591.10^{-5}$
σ	4.10^{-1}	4.10^{-1}

La figure III.12 présente la température (ou taille de grains) calculée en fonction de la température (ou taille de grains) mesurée.

Validité de la procédure

L'étude de la validité de ces critères (aires et aires réduites des bandes) est étudiée en réalisant un calcul direct de la température et de la taille de grains avec ces critères sur les 47 meilleurs spectres expérimentaux entre 77 et 140 K. Le tableau III.8 montre les bons résultats obtenus avec cette méthode :

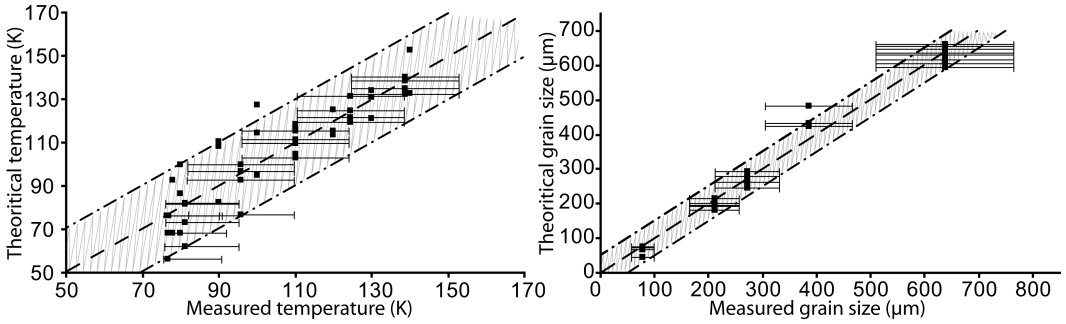


FIGURE III.12 – A gauche, évolution de la température calculée en fonction de la température mesurée. A droite, évolution de la taille de grains calculée en fonction de la taille de grains mesurée. Les droites noires représentent la fonction $y = x$.

TABLE III.8 – Moyenne et écart type des différences entre les valeurs mesurées et calculées

	$\lvert T_{mes} - T_{th} \rvert$ (K)	$\lvert D_{mes} - D_{th} \rvert$ (μm)
Moyenne	7,67	19,70
Ecartype	6,60	17,24

Les moyennes sont plus élevées que dans la section III.2.3, mais les calculs ont été réalisés sur la valeur absolue de la différence.

De plus, la figure III.13 présente les distributions en température et en taille de grains calculées pour des erreurs relatives de 10 K et 25 μm.

Les paramètres obtenus ainsi que la procédure de traitement décrite dans le chapitre précédent peuvent être utilisés sur des images hyperspectrales issues de l'imageur VIMS à bord de Cassini.

Trois critères ont ainsi été retenus pour décrire l'évolution de la signature spectrale de la glace d'eau : l'aire de Riemann de la totalité de la bande d'absorption à 1,50 μm en fonction de la taille de grains et les aires réduites des bandes d'absorption à 1,30 et 1,50 μm en fonction de la température et de la taille de grains.

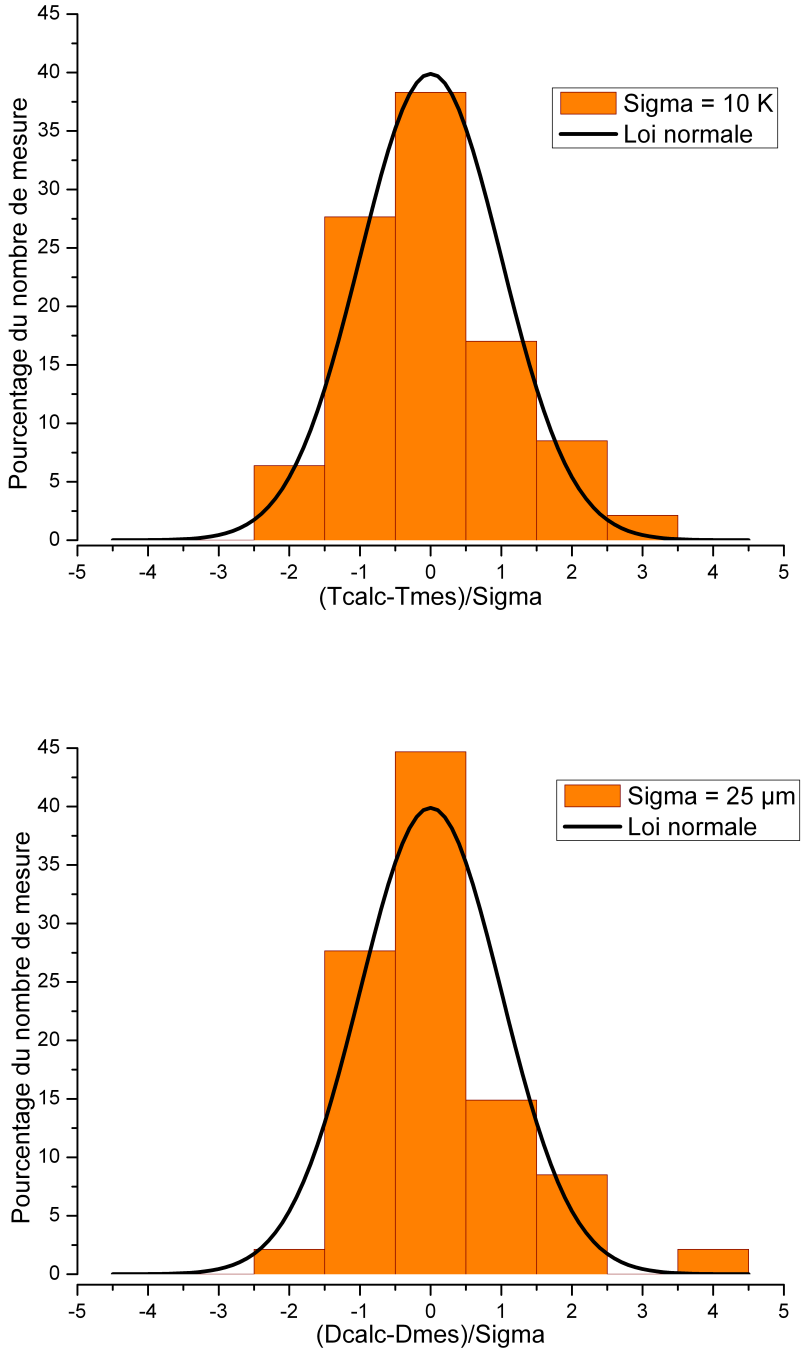


FIGURE III.13 – Représentation de la distribution en température (en haut) et en taille de grains (en bas) pour des erreurs relatives de 10 K et 25 μm.

Ce chapitre a traité exclusivement des résultats obtenus sur la glace d'eau pure. Les protocoles de synthèse et de chargement ont, d'abord, été exposés, ensuite, une sélection de données et de paramètres à étudier a été proposée. Par la suite, l'étude de l'influence en température et en taille de grains sur les spectres de glace d'eau a été détaillée. Les différentes méthodes de traitement, expliquées dans le Chapitre II, ont été utilisées sur les données obtenues des spectres de glace d'eau. La dépendance en taille de grains et en température a pu être clairement quantifiée grâce à l'utilisation des aires et des aires réduites des bandes d'absorption à 1,30 et 1,50 μm. Le tableau III.9 synthétise les caractéristiques spectrales d'un échantillon de glace d'eau (210 μm, 80 K). Ces bandes sont exploitables sur les données naturelles obtenues par le spectro-imageur VIMS de la mission Cassini, voir chapitre V. Le chapitre suivant présente les spectres expérimentaux de glace de dioxyde de carbone pure ainsi que son influence sur la signature spectrale de glace d'eau lors d'un mélange ou de la formation de clathrates de dioxyde de carbone.

TABLE III.9 – Caractéristiques spectrales de la glace d'eau (210 μm, 80 K).

Bandes	1,05 μm	1,25 μm	1,30 μm	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm
Centre (μm)	1,474	1,261	1,309	1,485	1,556	1,646
Largeur (μm)	0,028	0,040	0,009	0,031	0,032	0,043
Profondeur	0,054	0,103	0,020	0,462	0,340	0,246
Bandes	2,00 μm	2,95 μm	3,09 μm	3,15 μm	3,60 μm	
Centre (μm)	2,013	2,964	3,080	3,187	3,663	
Largeur (μm)	0,059	0,098	0,097	0,105	0,097	
Profondeur	0,310	0,007	0,014	0,005	0,010	

Chapitre IV

L'influence du dioxyde de carbone

Ce chapitre présente les différents travaux expérimentaux qui ont été effectués sur l'influence du dioxyde de carbone sur la glace d'eau. Par ailleurs, le dioxyde de carbone est observé à la surface des satellites de glace. En revanche, aucune certitude n'est établie quant à son maintien en surface ou son état physique. Cependant, l'interaction entre les glaces d'eau et de dioxyde de carbone est inévitable. Les signatures spectrales du dioxyde de carbone pur, des mélanges de glaces d'eau et de dioxyde de carbone ainsi que des clathrates seront présentées de manière à comprendre l'influence du CO_2 sur la signature de la glace d'eau. Ce chapitre est découpé en trois sections. D'abord, les protocoles expérimentaux d'analyse du CO_2 solide et gazeux, des mélanges de glaces d'eau et de CO_2 puis des clathrates de CO_2 seront décrits. Ensuite, après le rappel des protocoles d'acquisition, les signatures spectrales des différents constituants seront exposées pour finalement, être comparées les unes aux autres.

IV.1 Protocoles expérimentaux

Cette section détaille les différents protocoles expérimentaux élaborés pour les études de la glace de dioxyde de carbone, des mélanges de glaces d'eau et de dioxyde de carbone et des clathrates de dioxyde de carbone. Les analyses réalisées sur ces composants ont été effectuées avec le cryostat à azote liquide présenté dans la section II.1.1.

IV.1.1 Le dioxyde de carbone pur

Le cryostat à azote liquide associé à la dernière cellule conçue (voir section II.1.1) permet de travailler sur des grains de dioxyde de carbone à l'échelle microscopique. Les spectres sont acquis sur des grains de différentes tailles et sur une gamme de température comprise entre 80 et 190 K, les températures d'ébullition de l'azote liquide et de sublimation du CO_2. Les tailles de grains sont mesurées sur des photographies acquises au cours de l'expérience (voir section IV.2). Á une température supérieure à la température de condensation du dioxyde de carbone, le constituant est à l'état gazeux dans la cellule, ce qui permet l'acquisition de spectres infrarouges de dioxyde de carbone gazeux en réflectance. Cette partie se découpe en deux paragraphes, le premier explique le protocole expérimental de la synthèse dans la cellule de la glace de dioxyde de carbone et le second, celui du dioxyde de carbone gazeux.

La glace

Á une température supérieure à la température de condensation du gaz, la cellule à l'intérieur du cryostat est purgée par du gaz de CO_2 via le capillaire qui conduit à la fois à la bouteille et à la pompe à vide. Ensuite le dioxyde de carbone est introduit dans la cellule par le capillaire à environ 1,5 bar. Á ce moment, la pompe à vide est arrêtée pour

limiter les éventuelles fuites de gaz. Finalement, la température est diminuée jusqu'à 80 K. L'étude peut alors commencer : des spectres sont acquis sur différents grains par paliers de température (les paliers varient de 1 à 5 K). Au final, une soixantaine de spectres ont été acquis entre 78,7 et 115 K.

Les grains de glace de CO_2 sont dans une atmosphère de dioxyde de carbone à une pression imposée par la température. La cellule étant un système fermé, l'équilibre entre le dioxyde de carbone dans l'atmosphère et la glace se trouve précisément sur la courbe de sublimation du dioxyde de carbone. La pression dans la cellule peut donc être connue grâce à la mesure de température.

Le gaz

Le cryostat à azote liquide permet également d'étudier des gaz. Le gaz de CO_2 a été introduit dans le cryostat grâce à un capillaire passant par le tuyau de la pompe à vide (voir section II.1.1). La pression du gaz introduit est gérée de manière à obtenir la pression interne voulue. Cette étude a été réalisée avant l'installation de la cellule à atmosphère contrôlée. La liste des spectres de dioxyde de carbone gazeux dans le cryostat à azote liquide est en annexe A.

IV.1.2 Les mélanges de glaces d'eau et de dioxyde de carbone

Cette section concerne les expériences effectuées sur les mélanges des deux glaces d'eau et de CO_2. Elle s'articule en deux paragraphes qui décrivent les protocoles de synthèse et de chargement des mélanges de glaces de CO_2 et d'H_2O. La première concerne les tests préliminaires effectués avant le développement de la cellule à atmosphère contrôlée et la seconde les études réalisées dans cette cellule.

Tests préliminaires

Le cryostat à azote liquide permet d'introduire successivement des gaz de natures différentes qui pourront se condenser séquentiellement sur la plaque de cuivre. Dans cette étude préliminaire, de la vapeur d'eau suivie du gaz de CO_2 ont été introduits dans la cellule, avec des quantités non contrôlées, pour se condenser sur une plaque de cuivre. Comme la description du cryostat le présente, voir section II.1.1, les différents gaz sont introduits dans la cellule par aspiration de la pompe à vide.

Des tests ont été réalisés sur des mélanges de glace à l'échelle macroscopique. L'échantillon est d'abord synthétisé dans la chambre froide en pilant des bâtonnets de carboglace achetés (Air Liquide). Ensuite, les grains de dioxyde de carbone, sur lesquels l'eau atmosphérique s'est condensée, sont chargés dans le cryostat à azote liquide selon le même protocole de chargement que la glace d'eau pure. Ces grains ne sont pas tamisés car le taux de sublimation est important, le tamisage aurait été erroné. Ce protocole ne permet pas de quantifier les espèces présentes.

Ces protocoles ont permis de réaliser des études préliminaires sur les mélanges de glaces d'eau et de dioxyde de carbone aux échelles microscopique et macroscopique.

Etude dans la cellule à atmosphère contrôlée

Le dispositif expérimental de l'étude du CO_2 pur est utilisé pour les mélanges, à la différence que des grains de glace d'eau sont introduits, au préalable, dans la cellule isolée. Dans la chambre froide, des grains de glace d'eau pure sont broyés puis tamisés (la taille de grains est inférieure à 250 μm) au dessus de la cellule à atmosphère contrôlée. Ensuite, la cellule est fermée et installée dans le cryostat à froid (environ 200 K). A la sortie de la chambre froide, le cryostat est installé sous le microscope associé au

spectromètre à transformée de Fourier pour l'analyse. Du gaz de dioxyde de carbone est, ensuite, introduit dans la cellule par le capillaire. A sa condensation, un mélange linéaire se forme entre les grains de dioxyde de carbone et de glace d'eau.

Aucun dispositif n'a pu être élaboré au sein du laboratoire, pour le moment, pour améliorer le protocole expérimental de l'étude macroscopique du mélange des glaces d'eau et de dioxyde de carbone.

IV.1.3 Les clathrates de dioxyde de carbone

Cette section présente les protocoles de synthèse et de chargement des clathrates de dioxyde de carbone pour l'analyse en spectroscopie infrarouge. Cette partie se découpe en deux paragraphes qui traitent, d'une part, de la synthèse et, d'autre part, du chargement.

Synthèse

La synthèse de clathrates de dioxyde de carbone est réalisée en autoclave. La figure IV.1 est une illustration du dispositif expérimental de formation des clathrates de CO_2. L'eau pure est introduite dans l'autoclave (entre 6 et 10 ml) qui est ensuite mis sous pression par injection de dioxyde de carbone gazeux (jusqu'à 50 bar environ). Un ou deux cycles en température sont effectués entre -10°C et 6°C de manière à obtenir un maximum de clathrates de CO_2 à l'ouverture de l'autoclave. Ces cycles sont effectués par introductions et sorties successives de l'autoclave dans la chambre froide. La dépression de l'autoclave provoque une descente en température jusqu'à -50°C ce qui permet de figer l'état solide des clathrates. Si la dépression est réalisée de manière très douce et très lente, la température peut ne descendre qu'à -25°C. L'autoclave est ouvert, après



FIGURE IV.1 – Photographie du dispositif expérimental de fabrication des clathrates de CO_2.

réchauffement lent dans la chambre froide, à $-20°C$, sous une atmosphère pauvre en vapeur d'eau, ce qui assure une pollution minimale du matériau. A l'ouverture de l'autoclave, les échantillons de clathrates paraissent plus blancs et plus aérés que la glace d'eau pure. Les glaçons de clathrates sont broyés pour former de petits grains de clathrates. Leur concassage provoque une sonorité de craquement et de crépitement signe d'une réussite de la synthèse. Ces sons sont produits par la dissociation des cages lors des chocs du pilon qui libèrent du gaz. De plus, les clathrates de CO_2 ont un goût d'eau pétillante très acide. Tous ces signes nous permettent d'identifier le bon fonctionnement de la synthèse des clathrates en autoclave à partir d'eau liquide et de gaz de dioxyde de carbone. L'utilisation d'un autoclave permet de produire des clathrates de dioxyde de carbone en grande quantité. La méthode de production est assez facile à mettre en oeuvre.

Chargement

Le chargement des clathrates de dioxyde de carbone, à l'échelle macroscopique, dans la coupelle de cuivre du cryostat à azote liquide s'effectue rapidement dans la chambre froide selon le même protocole que pour la glace d'eau pure.

Les clathrates de dioxyde de carbone sont également étudiés à l'échelle microscopique. Des grains tamisés au tamis de 180 μm de côté (soit des grains inférieurs à 250 μm), sont déposés dans la cellule à atmosphère contrôlée, identique à celle utilisée pour l'étude du CO_2 pur mais avec le capillaire bouché, selon le même protocole que l'introduction de grains de glace d'eau pure dans le cas des mélanges de glaces d'eau et de CO_2 à l'échelle microscopique. Ces grains sont analysables au microscope du spectromètre infrarouge.

Cette section a présenté les différents protocoles de chargement des constituants étudiés dans ce chapitre. La section suivante expose le protocole d'acquisition des données, les différents spectres obtenus, et le choix des bandes étudiées.

IV.2 Acquisition des données

Les signatures spectrales de la glace de dioxyde de carbone, des mélanges de glaces et des clathrates de dioxyde de carbone sont obtenues grâce au spectromètre infrarouge à transformée de Fourier Nicolet 5700 de Thermofisher et du microscope Continμum associé. Cette section, découpée en trois parties, présente le protocole d'acquisition, les spectres et les images obtenus sur les différents constituants étudiés dans ce chapitre et les bandes d'absorption d'intérêt pour ce travail.

IV.2.1 Configuration d'acquisition

Les études à l'échelle microscopique sur le dioxyde de carbone solide et gazeux, sur les mélanges de glaces d'eau et de CO_2 ainsi que sur les clathrates de dioxyde de carbone, sont effectuées avec le microscope infrarouge avec la configuration de l'appareil détaillée dans la section II.2.2. Le background des échantillons à l'échelle microscopique est acquis sur le fond de la cellule à atmosphère contrôlée ou sur la plaque en cuivre pour les tests préliminaires. Lorsque du gaz est introduit, la référence spectrale est obtenue après sa condensation partielle, de manière à limiter, voire éliminer, la contribution du gaz restant dans l'atmosphère de la cellule.

IV.2.2 Présentation des spectres et des images

Cette partie expose les spectres et les images des constituants étudiés dans ce chapitre.

Le dioxyde de carbone.

Les spectres de dioxyde de carbone solide sont acquis sur des grains, de différentes tailles, condensés sur une surface en cuivre, dans la cellule à atmosphère contrôlée, entre 80 et 115 K avec le microscope du spectromètre infrarouge à transformée de Fourier. La figure IV.2 présente la signature spectrale d'un grain de dioxyde de carbone à 100 K. Le spectre de dioxyde de carbone solide présente de nombreuses bandes d'absorption plus ou moins fines. Plusieurs séries de bandes sont observables autour de 1,4 μm, 2 μm, 2,7 μm, 4,2 μm et 4,89 μm. Les figures I.10 (a) à (d) sont des agrandissements du spectre de CO_2 solide. Ces agrandissements permettent une meilleure évaluation de la position des bandes d'absorption. La forte réflexion de la bande à 4,2 μm sur la fi-

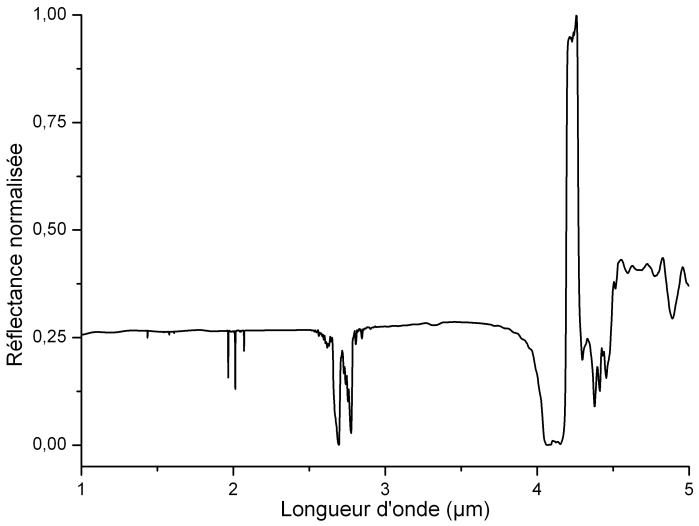


FIGURE IV.2 – Signature spectrale d'un grain de dioxyde de carbone de 230 μm à 78,9 K acquis dans la cellule du cryostat à azote liquide.

gure I.10d est provoquée par une réflexion de Fresnel. La liste des spectres de dioxyde de carbone solide obtenus à l'échelle microscopique dans le cryostat à azote liquide est dans l'annexe A.

A chaque acquisition spectrale, une photographie du grain analysé est enregistrée grâce à une caméra optique installée sur le microscope infrarouge. L'étalonnage des photographies a été réalisé à l'aide d'un fil de tungstène dont le diamètre est précisément connu. En effet, les deux fenêtres en saphir déformant le chemin optique parcouru par la lumière, la mesure des dimensions des grains ne peut être sûre sans étalonnage. La figure IV.3 est une photographie du grain de CO_2 dont le spectre est présenté sur la figure IV.2. Les images de grains de CO_2 présentent souvent une irisation due à un phénomène d'interférence. Par ailleurs, ce phénomène se retrouve sur les spectres par une ondulation du continuum plus ou moins importante. Avec une procédure d'étalon-

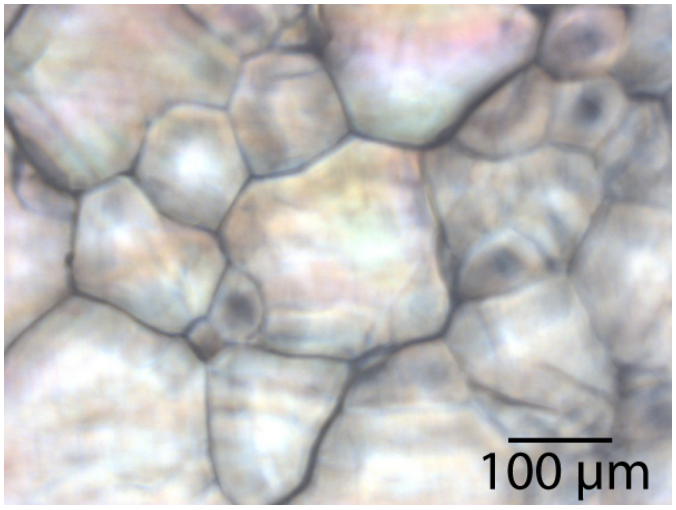


FIGURE IV.3 – Photographie de grains de glace de dioxyde de carbone à 100 K condensés dans la cellule de cuivre placée dans le cryostat.

nage qui n'a pas été mise en place dans cette étude, l'épaisseur des grains pourrait être déterminée.

Les spectres de dioxyde de carbone gazeux sont également acquis avec le microscope du spectromètre IR-TF. La figure IV.4 montre un spectre de dioxyde de carbone gazeux dans le cryostat à azote liquide à 290 K (pression non mesurée). Le spectre de dioxyde de carbone gazeux présente principalement deux domaines de longueurs d'onde dans lesquels sa signature est caractéristique. Deux bandes sont autour de 2,8 μm et une bande très profonde se situe autour de 4,2 μm. Cette bande très caractéristique est couramment utilisée pour la détection du dioxyde de carbone. Par ailleurs, la signature spectrale du dioxyde de carbone gazeux ne présente pas de bande d'absorption à 4,89 μm.

La liste des spectres de dioxyde de carbone gazeux dans le cryostat à azote liquide est en annexe A.

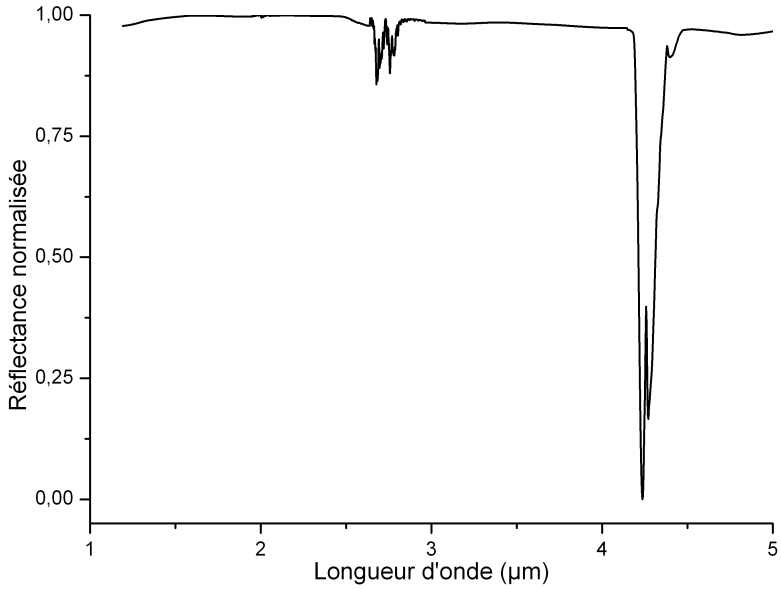


FIGURE IV.4 – Spectre de dioxyde de carbone gazeux à 290 K.

Mélange de glaces d'eau et de dioxyde de carbone.

A l'échelle microscopique, le protocole expérimental établi lors des tests préliminaires sur les mélanges, montre la condensation de dioxyde de carbone sur et autour des grains de glace d'eau précédemment condensés. La figure IV.5 montre deux images successives entre avant et après la condensation du CO_2 gazeux.

La figure IV.6 présente une image du mélange précédent de grains d'eau et de dioxyde de carbone avec sa signature spectrale associée.

Après 2 heures et demi d'interaction entre les grains d'eau et de dioxyde de carbone, la température est augmentée jusqu'à sublimation du dioxyde de carbone. Les figures IV.7 (a) et (b) sont, respectivement, des images de l'échantillon avant et après la sublimation du dioxyde de carbone. Les figures IV.7 (c), (d) et (e) sont des spectres ac-

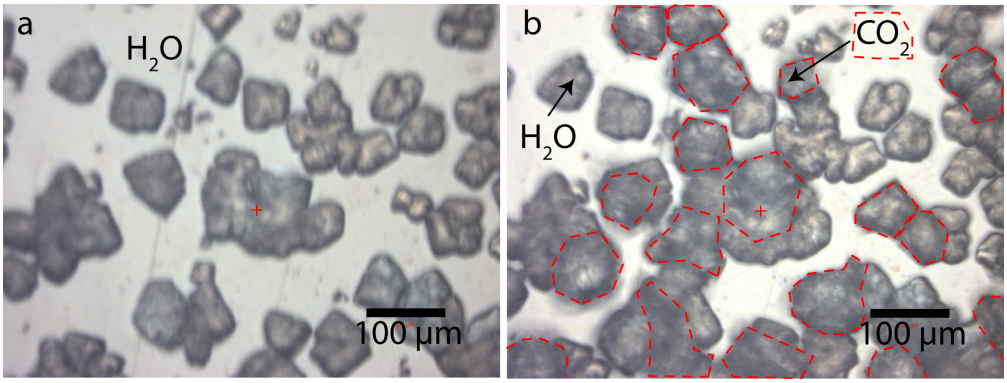


FIGURE IV.5 – a) Photographie de grains de glace d'eau déposés par condensation de vapeur d'eau sur la plaque de cuivre froide. b) Photographie de la même zone avec des grains de dioxyde de carbone déposés par condensation et entourés en pointillés rouges pour plus de clarté.

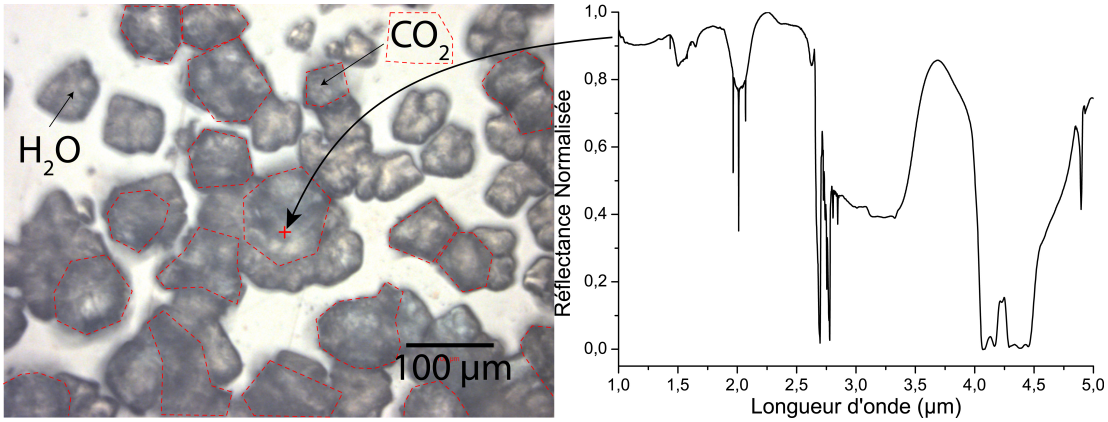


FIGURE IV.6 – Photographie d'un mélange de grains d'eau et de dioxyde de carbone formés par condensation du gaz de CO_2 sur des grains d'eau introduits en chambre froide. Le spectre, à droite, a été acquis sur le mélange, à environ 120 K.

quis sur différentes zones de l'échantillon : dans l'ordre, sur la superposition de grains d'eau et de dioxyde carbone avant sublimation, sur un grain d'eau qui n'a pas été au contact d'un grain de dioxyde de carbone et sur la même zone que IV.7c après la sublimation du dioxyde de carbone.

La figure IV.7c révèle la signature spectrale de la glace d'eau avec de larges bandes autour de 1,5 et 2 μm et des caractéristiques spectrales du dioxyde de carbone solide avec quelques bandes autour de 1,4 μm, 2 μm, 2,7 μm, 4,2 μm et 4,89 μm. Certaines bandes d'absorption du dioxyde de carbone sont cachées par les larges bandes de l'eau. Néanmoins, la signature du CO_2 est très reconnaissable. Les grains d'eau qui n'ont pas été au contact du dioxyde de carbone ne semblent pas voir leur structure changer puisque le spectre de la figure IV.7d présente un spectre de grain de glace d'eau pure. En revanche, la figure IV.7e montre une infime différence avec la figure IV.7d : un épaulement à 2,84 μm est visible sur le spectre d'un grain de glace d'eau ayant été en contact avec un grain de glace de CO_2 pendant plus de 3 heures. La partie du spectre constituant l'épaulement est composée d'une trentaine de points. L'épaulement était encore visible à 200 K. Ainsi, une interaction prolongée entre les glaces d'eau et de dioxyde de carbone semble provoquer des changements dans le réseau cristallin de l'eau. Une petite quantité de dioxyde de carbone a pu être adsorbée sur la glace d'eau et rester par métastabilité sur le grain d'eau jusqu'à 200 K (Hibbitts et Szanyi, 2007).

Cette expérience a été renouvelée avec la cellule à atmosphère contrôlée. Les grains de glace d'eau sont introduits dans la chambre froide, puis, après la fermeture de la cellule à atmosphère contrôlée et du cryostat, le dioxyde de carbone gazeux est introduit et se condense « aléatoirement » sur le fond de la cellule. Aussi, un mélange de grains de glace des deux constituants se forme. Le background est acquis après la condensation du gaz pour éliminer toute contribution de dioxyde de carbone dans l'atmosphère de la

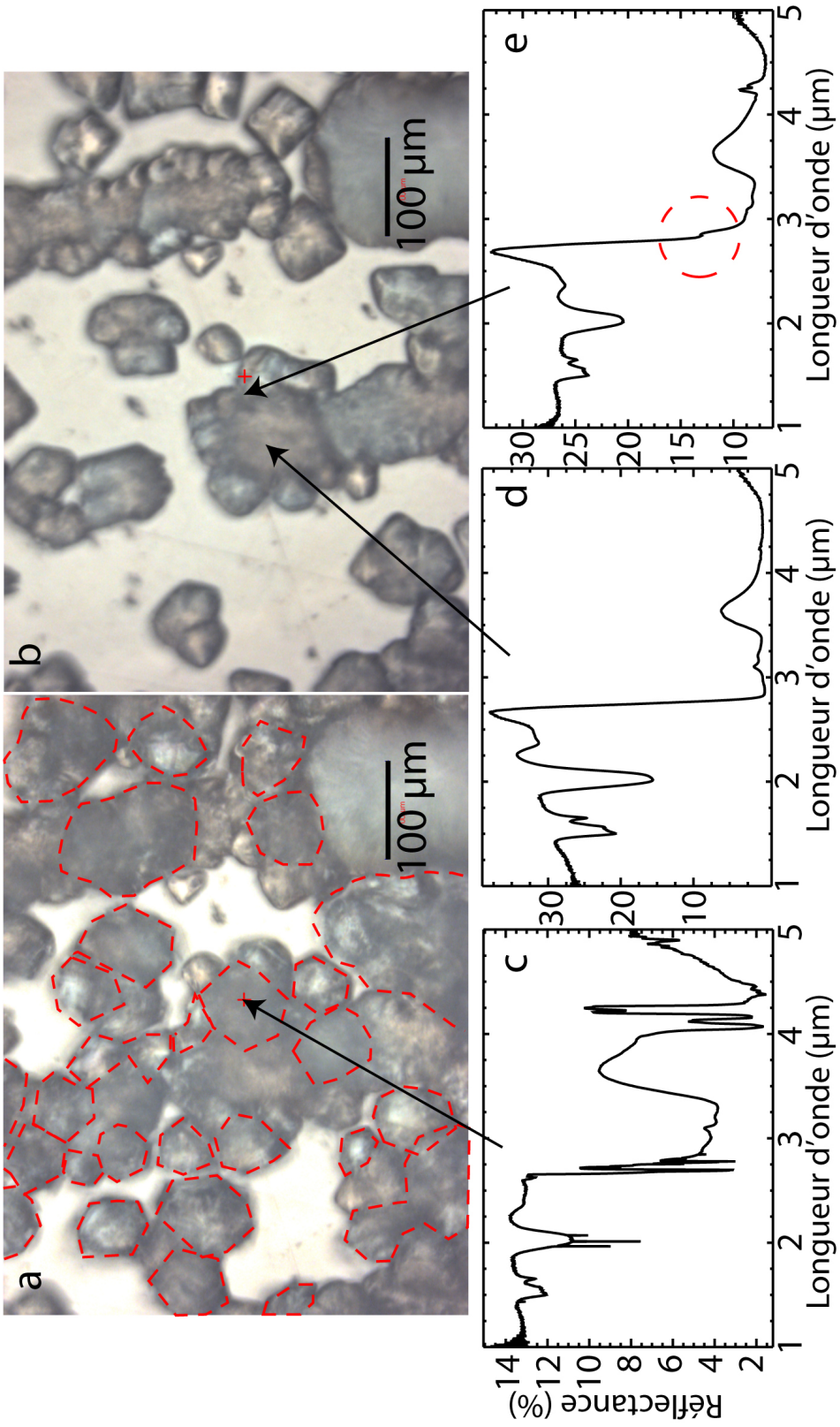


FIGURE IV.7 – a) Photographie de grains de glaces d'eau et de dioxyde de carbone déposés par condensation sur la plaque de cuivre froide. Les grains de dioxyde de carbone sont entourés en pointillés rouges pour plus de clarté. b) Photographie de la même zone après sublimation des grains de dioxyde de carbone. c) Spectre d'un mélange de grains d'eau et de dioxyde de carbone superposés. d) Spectre d'une zone de glace d'eau n'ayant pas été au contact de dioxyde de carbone solide. e) Signature spectrale d'une zone de glace d'eau ayant interagi avec un grain de dioxyde de carbone.

cellule. La figure IV.8 présente la signature spectrale d'un mélange de glaces d'eau et de dioxyde de carbone. Les caractéristiques spectrales des glaces d'eau (1,05, 1,30, 1,50, 2,00 et 3,10 μm) et de dioxyde de carbone (près de 2,00, 2,70, 4,20 et 4,89 μm) sont observables. Cette signature est induite par des photons ayant interagi i) uniquement avec les liaisons d'un grain de glace d'eau ou de CO_2 (cas d'un mélange linéaire) ou ii) avec les liaisons des deux types de glace (cas d'un mélange intime). La signature spectrale finale est le résultat de toutes ces interactions. Des études statistiques plus approfondies pourraient renseigner sur le type d'interactions privilégiées dans ces expériences.

Les images des mélanges de glaces à l'échelle microscopique sont réalisées sous le microscope du spectromètre infrarouge sur lequel une caméra a été installée. La figure IV.9 présente un exemple de photographie acquise à travers le microscope et les hublots de la cellule à atmosphère contrôlée.

A l'échelle macroscopique, les tests réalisés sur les mélanges de glaces d'eau et de dioxyde de carbone ne permettent pas actuellement de quantifier les espèces présentes. Avec les acquisitions spectrales effectuées sur les échantillons à l'échelle microscopique, des études sur la quantification des espèces sur les échantillons à l'échelle macroscopique pourront être exploitées prochainement. Le taux de sublimation de la glace de dioxyde de carbone est important et ne permet pas de réaliser un tamisage de la glace de dioxyde de carbone, ni de prendre des photographies des échantillons. La figure IV.10 est un spectre d'un échantillon de mélange de glaces d'eau et de dioxyde de carbone à l'échelle macroscopique. Les caractéristiques spectrales des deux constituants présents dans l'échantillon sont observables sur la signature spectrale de la figure IV.10

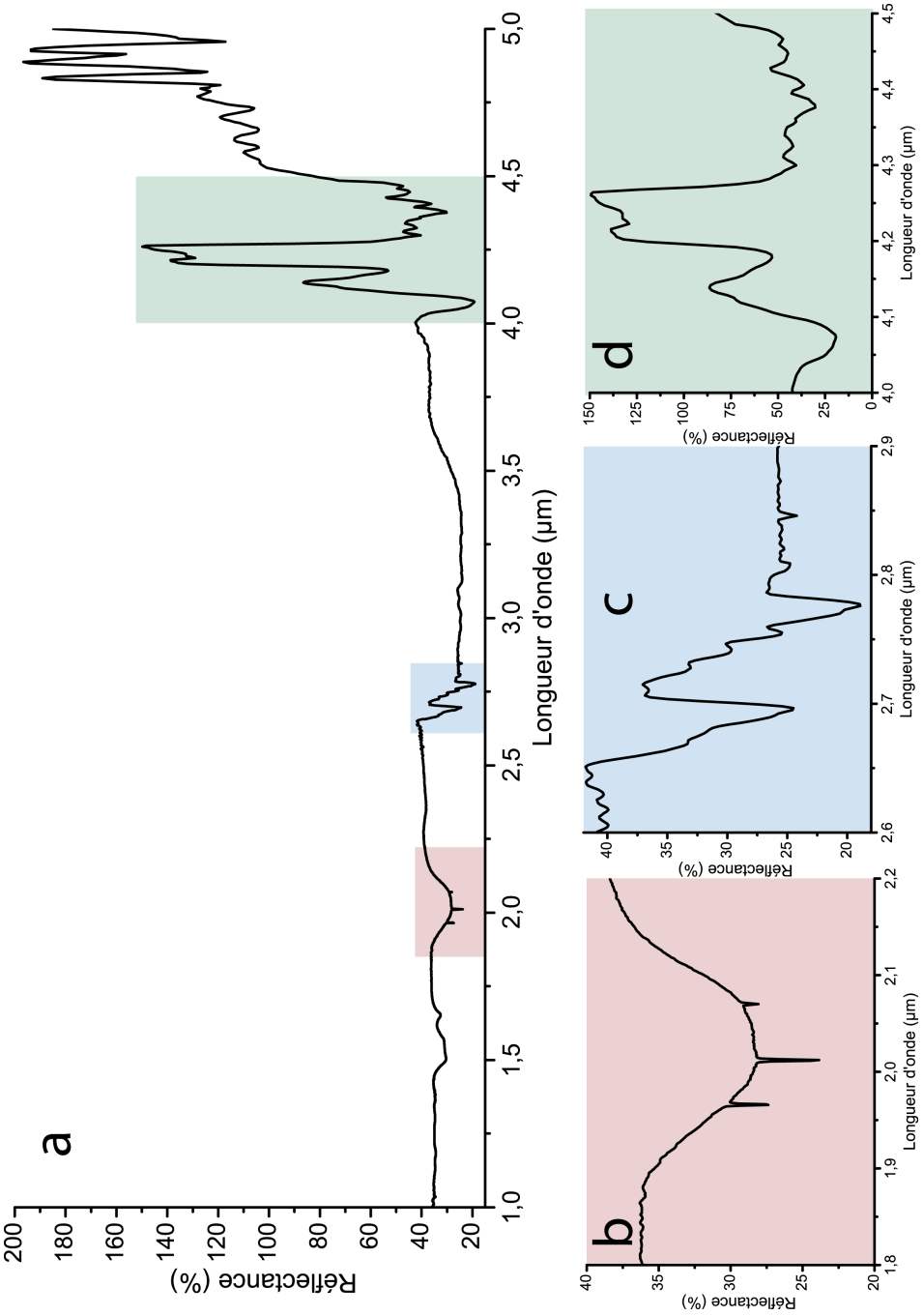


FIGURE IV.8 – Signature spectrale d'un mélange de glaces d'eau et de dioxyde de carbone à l'échelle microscopique. Mise en évidence de l'influence du dioxyde de carbone sur la signature spectrale a) entre 1 et 5 μm, b) entre 1,8 et 2,2 μm, c) entre 2,6 et 2,8 μm et d) entre 4,0 et 4,5 μm.

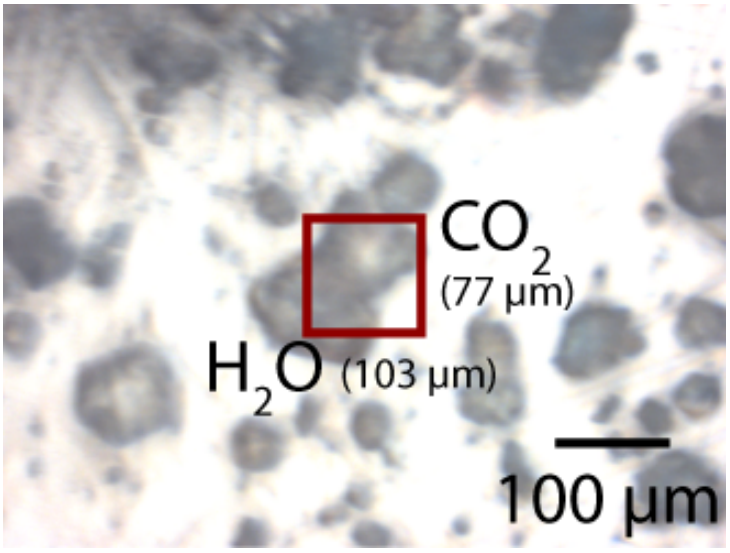


FIGURE IV.9 – Photographie d'un mélange de glaces d'eau et de dioxyde de carbone. Le carré au centre de l'image indique la position du spot d'acquisition.

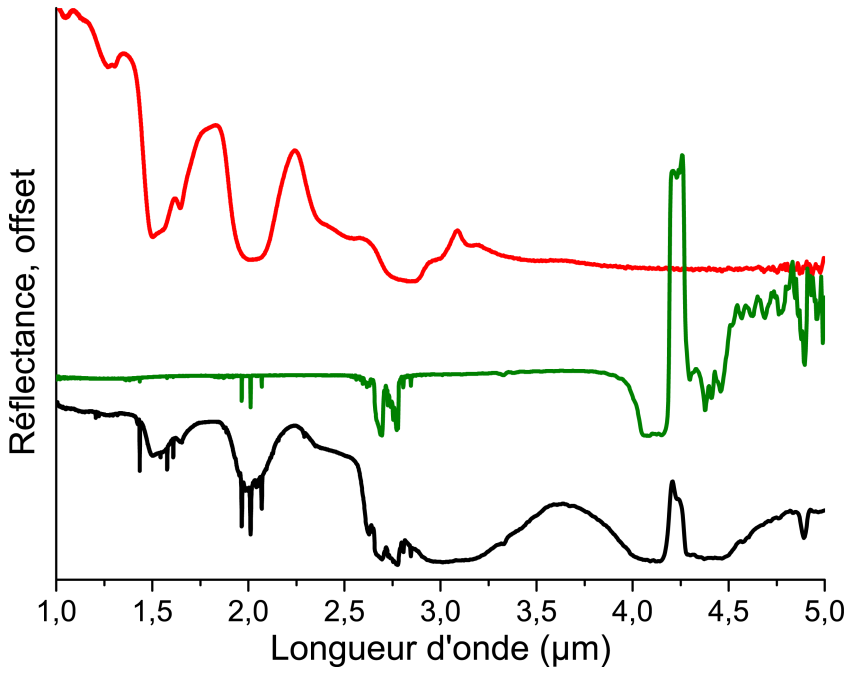


FIGURE IV.10 – Signature spectrale d'un mélange de glaces d'eau et de dioxyde de carbone à l'échelle macroscopique en noir. Spectre d'un échantillon de glace d'eau en rouge, à 80 K et 211 μm. Spectre d'un grain de dioxyde de carbone de 230 μm à 78,9 K, en vert

Les clathrates de dioxyde de carbone.

Les échantillons de clathrates sont broyés et tamisés de la même manière et avec les mêmes intervalles de tamis, leur taille de grains moyenne est donc considérée identique à celle des grains d'eau pure. Les échantillons analysés au cours de l'étude sont contraints en température et en taille de grains, ce qui permet d'obtenir des informations supplémentaires sur la signature spectrale des clathrates de CO_2. La figure IV.11a montre un spectre de clathrates de CO_2 obtenu par le même protocole d'acquisition spectrale que celui de la glace d'eau pure. Le background, à l'échelle macroscopique, est toujours l'Infragold©, voir la section II.2.3. Les figures IV.11 (b), (c), (d) et (e) sont des agrandissements des parties qui concernent la signature spectrale du dioxyde de carbone. Bien que la signature du dioxyde de carbone soit clairement visible, et à plusieurs endroits, la question de la pollution par l'eau est toujours en suspens. En effet, à l'ouverture de l'autoclave, pendant le broyage et durant le chargement, la pollution par l'eau atmosphérique contenue dans la chambre froide peut alors devenir non négligeable.

De plus, des photographies de clathrates de CO_2 à l'échelle macroscopique ont été acquises dans la chambre froide, sous un microscope binoculaire, avec le même procédé que pour la glace d'eau. La figure IV.12 présente une photographie de grain de clathrates de dioxyde de carbone broyés et tamisés en chambre froide.

A l'échelle microscopique, le background est acquis sur le fond de la cellule en cuivre entre les grains de clathrates. La figure IV.13 présente deux spectres de clathrates de dioxyde de carbone aux échelles macroscopique et microscopique. L'échantillon macroscopique a été broyé puis tamisé en chambre froide après ouverture de l'autoclave. Des photographies des grains de clathrates de CO_2 à l'échelle microscopique ont été acquises par la caméra, installée sur le microscope.

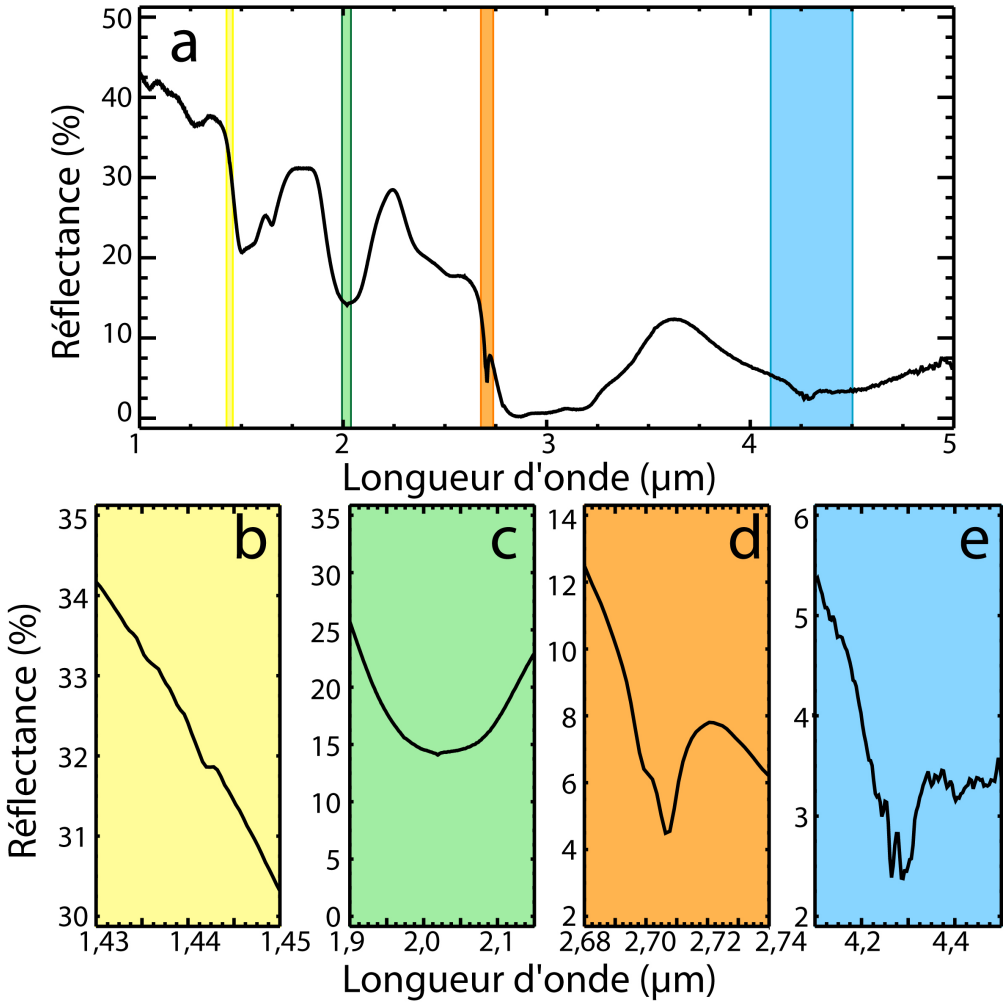


FIGURE IV.11 – a) Spectre d'un échantillon massif de clathrates de CO_2 fabriqué en autoclave et placé dans la coupelle d'analyse dans la chambre froide. b) Agrandissement de a entre 1,43 et 1,45 μm. c) Agrandissement de a entre 1,9 et 2,3 μm. d) Agrandissement de a entre 2,68 et 2,74 μm. Cette bande d'absorption est caractéristique des clathrates de dioxyde de carbone. e) Agrandissement de a entre 4,1 et 4,5 μm.

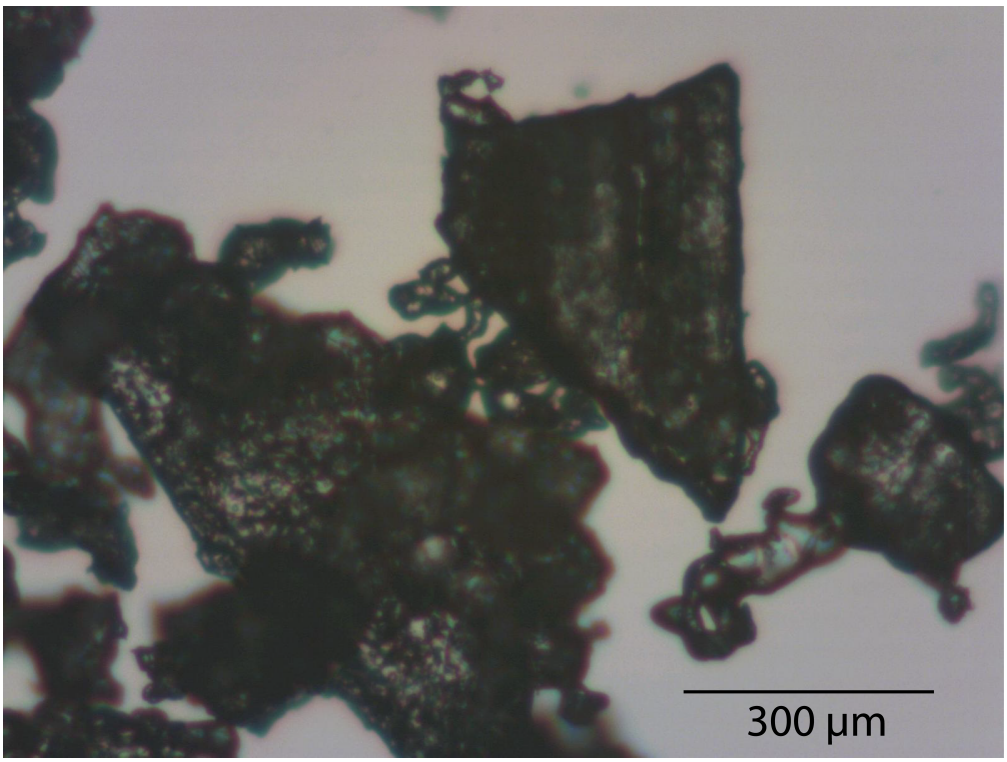


FIGURE IV.12 – Photographie de grains de clathrates de dioxyde de carbone broyés et tamisés en chambre froide acquise sous le microscope binoculaire à -20°C. La taille de grains de l'échantillon est d'environ 385 μm.

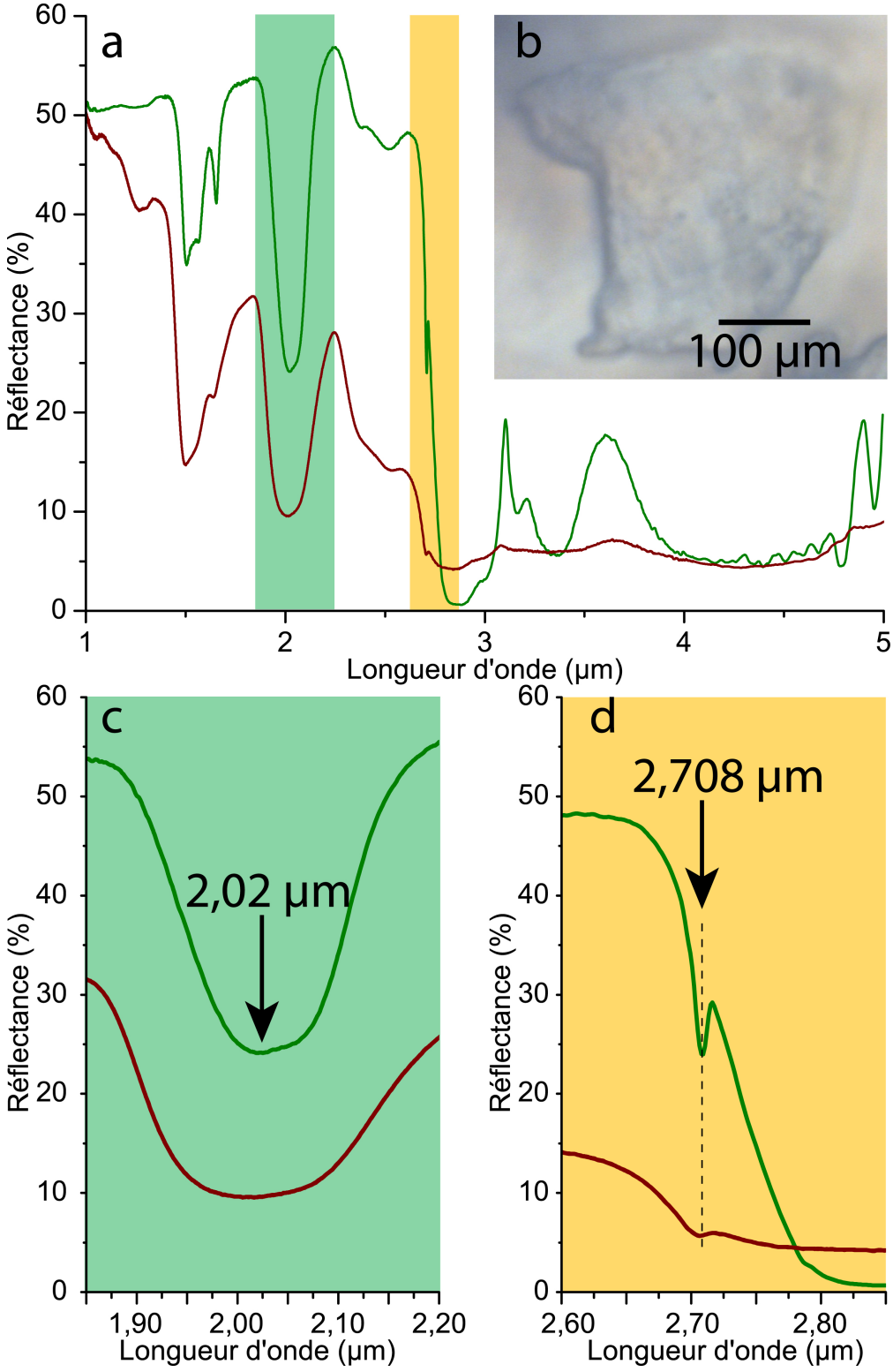


FIGURE IV.13 – a) Spectres d'un échantillon massif de clathrates de CO_2 de 272 μm à 110 K en bordeaux et d'un échantillon microscopique de 310 μm à 107 K en vert, synthétisés en autoclave, broyés, tamisés et placés dans leur coupelle d'analyse respective dans la chambre froide. b) Photographie du grain de clathrate de CO_2 associé au spectre vert de l'échantillon microscopique. c) Agrandissement de a entre 1,80 et 2,20 μm. La bande de CO_2 n'est que peu ou pas visible dans la forte absorption de l'eau à 2 μm. d) Agrandissement de a entre 2,60 et 2,90 μm. La bande caractéristique des clathrates de dioxyde de carbone à 2,708 μm est fortement visible dans l'échantillon microscopique mais reste observable dans l'échantillon macroscopique.

A l'échelle microscopique, des réflexions plus intenses sont observables après 4,5 μm sur la figure IV.13a. Elles pourraient être dues à la brillance du fond de la cellule en cuivre. Cependant, elles sont moins fortes que celles de la glace de dioxyde de carbone pure. Cette perte d'intensité provient de l'importante absorption de l'eau, présente dans le clathrate.

IV.2.3 Choix des bandes d'absorption étudiées

L'étude se porte vers les bandes d'absorption communes entre les glaces d'eau et de CO_2 pures et les clathrates ou mélanges des deux composants. Comme pour l'eau, les aires de Riemann ont été calculées pour les bandes d'absorption à 1,05, 1,30 et 1,50 μm. Le pic de Fresnel à 3,1 μm peut aussi être comparé à celui de la glace d'eau pure. De plus, les signatures spectrales des clathrates et des mélanges ont des bandes supplémentaires à celles de l'eau dues à la présence de dioxyde de carbone. Le clathrate de CO_2 présente une bande autour de 2,7 μm et une double bande vers 4,2 μm. Ces deux bandes sont intéressantes à examiner pour les comparer à la glace de CO_2 pure. La bande à 2,7 μm a d'abord été ajustée par deux gaussiennes puis l'aire de Riemann a été étudiée. Les bandes d'absorption à 1,44 et 2,01 μm sont parfois visibles mais très peu exploitables à cause de la forte signature de l'eau.

Après l'étude de la glace de dioxyde de carbone pure, deux études ont été menées sur i) la signature spectrale du mélange des deux glaces CO_2 et H_2O et ii) la signature spectrale des clathrates de dioxyde de carbone (aux échelles microscopique et macroscopique). Ces études permettront de comprendre l'influence du dioxyde de carbone sur le spectre de glace d'eau et d'obtenir expérimentalement les différences entre les signatures spectrales du clathrate par rapport au mélange.

Cette section a rappelé la configuration d'acquisition des signatures spectrales infrarouges des constituants analysés, puis a exposé les différentes données spectrales et photographiques acquises au cours des expériences, et enfin, a détaillé le choix des bandes d'absorption étudiées. La section suivante concerne les traitements numériques appliqués sur les différentes signatures.

IV.3 Traitement des données

Les traitements numériques mis en place permettent de comparer les différentes signatures spectrales des glaces pures, des mélanges et des clathrates. Comme pour la glace d'eau, les spectres de clathrates et de mélanges ont été lissés, fortement sur les bords et de manière plus faibles sur le centre du spectre. Cette section se décompose en quatre parties : la comparaison des signatures spectrales de la glace d'eau et des clathrates de CO_2, puis du dioxyde de carbone et des clathrates de CO_2, puis des glaces d'eau et de dioxyde de carbone pures et de leur mélange, et pour terminer, des mélanges et des clathrates de dioxyde de carbone.

IV.3.1 Signatures infrarouges de la glace d'eau et des clathrates de CO_2

Dans cette partie, les signatures infrarouges de la glace d'eau et des clathrates de dioxyde de carbone sont comparées. D'abord, un spectre de clathrate de CO_2 obtenu avec le matériel du laboratoire est comparé à un spectre publié par Smythe (1975). Ensuite, les spectres de glace d'eau et de clathrates de dioxyde de carbone sont comparés. Enfin, des calculs sur les aires de Riemann sur les spectres de clathrates de CO_2 sont présentés.

Comparaison avec une étude précédente

La figure IV.14a montre un spectre d'un échantillon massif de clathrates de CO_2 comparé à un spectre de laboratoire de Smythe (1975). La seule différence avec un spectre d'eau est un épaulement à 2,7 μm visible également chez Smythe (1975), figure IV.14b. Mais ce spectre est probablement pollué par le givre d'eau atmosphérique car les autres spectres de ce même article, notamment celui de la glace de dioxyde de carbone pur, montrent également des signes de pollution d'eau atmosphérique. Les spectres obtenus de nos expériences sont très proches de ceux obtenus dans la littérature (Smythe, 1975). Cependant, des bandes d'absorption supplémentaires correspondant au dioxyde de carbone ont été relevées.

L'eau et les clathrates

La figure IV.15 présente deux spectres de clathrates de dioxyde de carbone et de glace d'eau, de 385 μm à 120 K, en longueur d'onde entre 1 et 5 μm. La signature de clathrates de CO_2 a une réflectance plus importante que l'eau, (entre 15 et 45% pour l'eau selon la taille de grains et 45 à 65% pour les clathrates de CO_2). Cette différence est visible à l'oeil nu, l'aspect des clathrates est plus blanc que la glace, qui est quant à elle plus translucide. Les figures IV.16a, b et c montrent trois agrandissements des deux spectres à 1,05, 1,30 et 1,50 μm. Les bandes d'absorption à 1,05, 1,30, et 1,50 μm des clathrates sont identiques à celles de l'eau. Cependant, la bande à 1,65 μm paraît un peu moins profonde dans la signature du clathrate que dans celle de l'eau. Les figures IV.17a et b représentent des agrandissements des spectres à 3,1 et 3,65 μm. Le pic de Fresnel à 3,1 μm semble présent dans les deux structures cristallines. Le pic semble s'agrandir quand la température augmente mais ne semble pas montrer la présence de

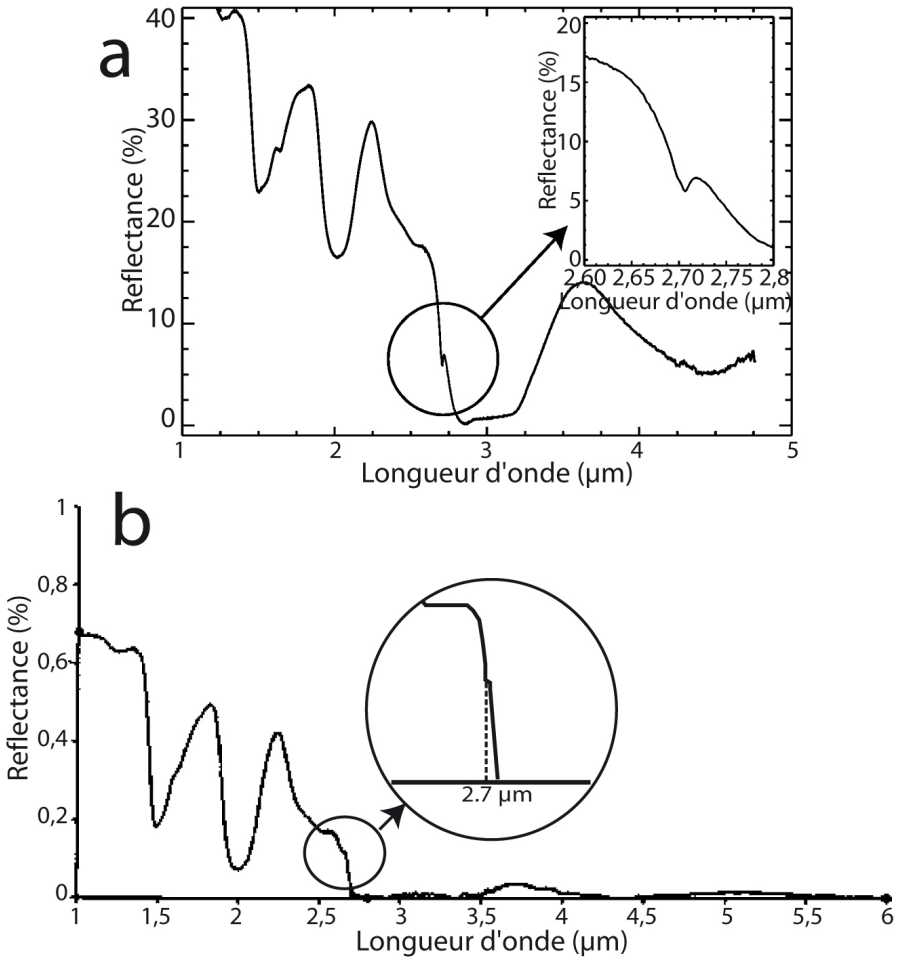


FIGURE IV.14 – a) Spectre d'un échantillon massif de clathrates de CO_2 synthétisé en laboratoire dans un autoclave et chargé dans la coupelle d'analyse en chambre froide. Cet échantillon n'a pas été contraint en taille de grains, la température d'acquisition est d'environ 80 K. b) Spectre de clathrates de CO_2 acquis en laboratoire par Smythe (1975). Les contraintes en taille de grains et en température ne sont pas connues.

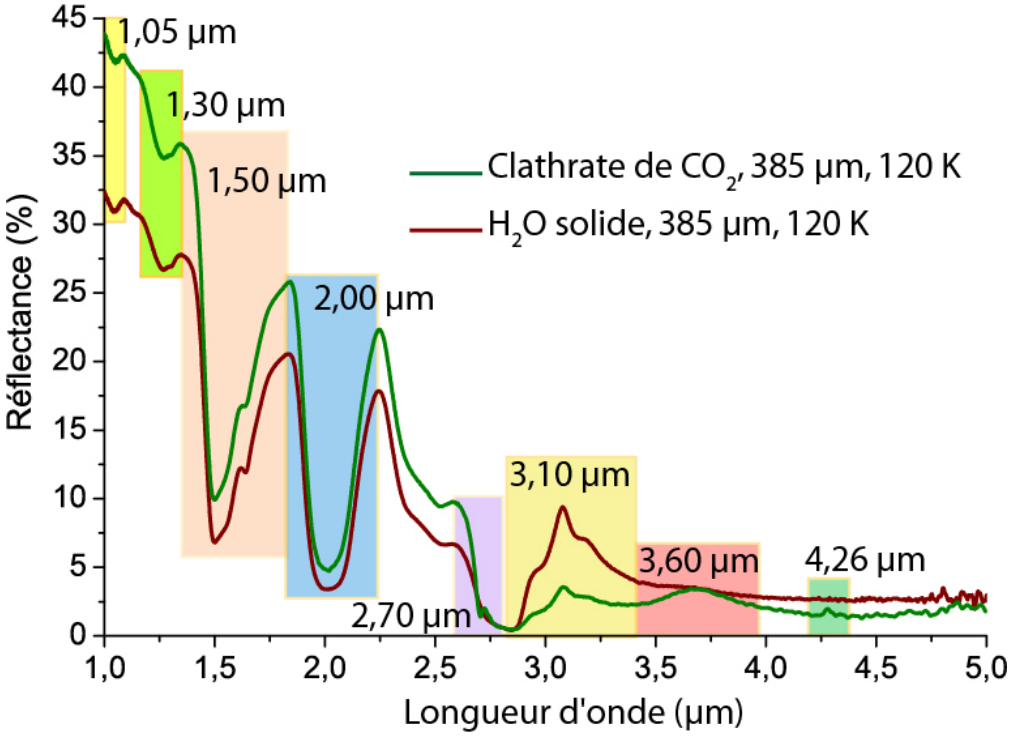


FIGURE IV.15 – Spectres d'échantillons macroscopiques de glace d'eau et de clathrates de dioxyde de carbone de 385 μm, entre 1 et 5 μm, à 120 K.

glace amorphe comme pour la glace d'eau. En revanche, la large bande autour de 3,65 μm est plus proéminente dans la signature du clathrate et est absente de la signature de l'eau pour les grandes tailles de grains (supérieures à 250 μm). Cette bande s'étale entre 3,35 et 4,00 μm et atteint un maximum entre 3,60 et 3,70 μm selon la température et peut-être la taille de grains. La partie du spectre à 1,8 μm, entre les bandes à 1,50 et 2,00 μm, paraît avoir une pente plus élevée dans la signature du clathrate que dans celle de la glace pure, mais aucune étude détaillée n'a pu être réalisée sur cette signature. Les différentes vibrations des clathrates sont indiquées dans un tableau de la section IV.3.5.

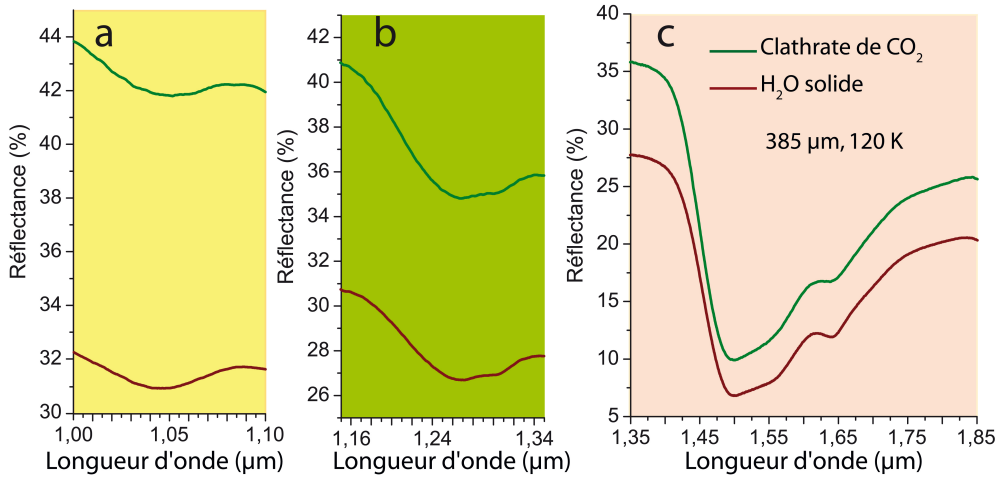


FIGURE IV.16 – Spectres d'échantillons macroscopiques de glace d'eau et de clathrates de dioxyde de carbone de 385 μm, à 120 K. a) Agrandissement entre 1,00 et 1,10 μm, b) agrandissement entre 1,15 et 1,35 μm et c) agrandissement entre 1,35 et 1,85 μm.

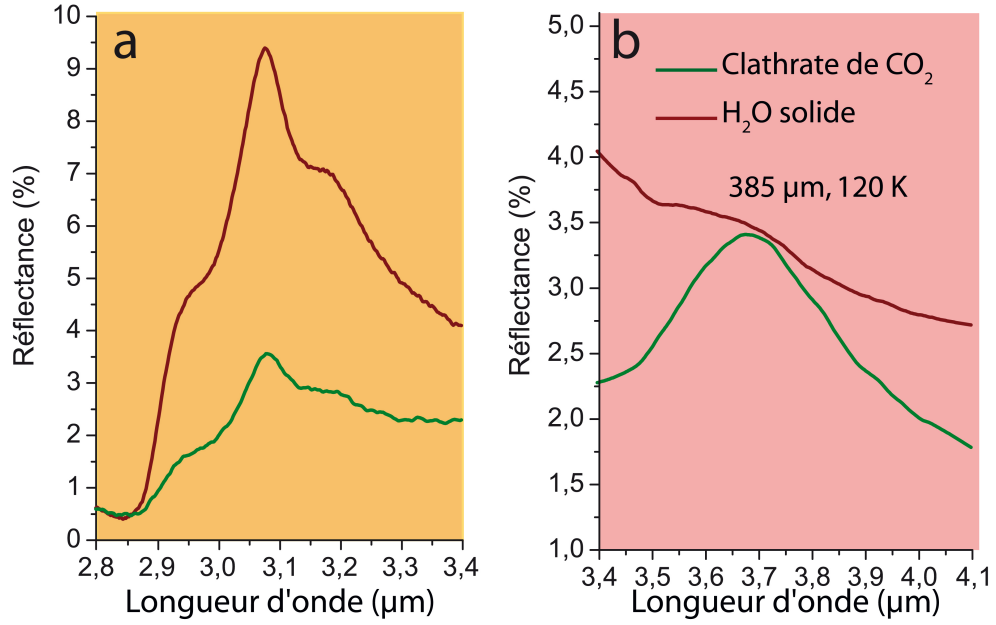


FIGURE IV.17 – Spectres d'échantillons macroscopiques de glace d'eau et de clathrates de dioxyde de carbone de 385 μm, à 120 K. a) agrandissement entre 2,8 et 3,4 μm, b) agrandissement entre 3,4 et 4,1 μm.

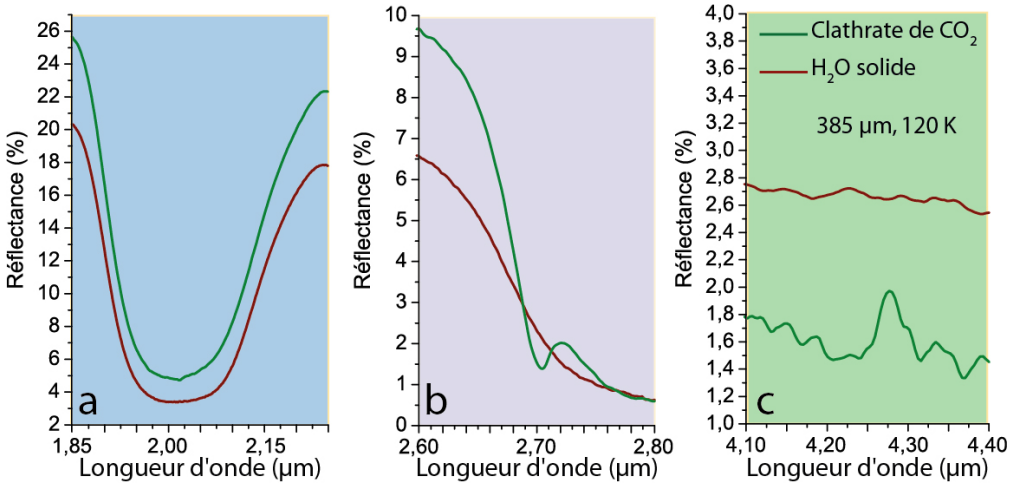


FIGURE IV.18 – Spectres d'échantillons macroscopiques de glace d'eau et de clathrates de dioxyde de carbone de 385 μm, à 120 K. a) agrandissement entre 2,6 et 2,8 μm, b) agrandissement entre 4,1 et 4,4 μm.

Étude des aires

Comme les ajustements de la bande à 1,50 μm par sommation de gaussiennes n'ont pas été concluant pour étudier la dépendance en température et en taille de grains des échantillons de glace d'eau pure, aucune étude sur les spectres de clathrates ou de mélange n'a été effectuée sur cette même bande avec cette méthode.

Les aires de Riemann des bandes 1,05, 1,30 et 1,50 μm ont été calculées. La figure IV.19 présente l'évolution des aires de Riemann de ces bandes en fonction de la taille de grains et de la température. Aucune loi de dépendance en température ou en taille de grains n'est réellement observable. Une forte diminution des aires est visible au delà de 140 K, qui est proche de la température de dissociation des clathrates dans une enceinte dont la pression est comprise entre 20 et 100 mbar.

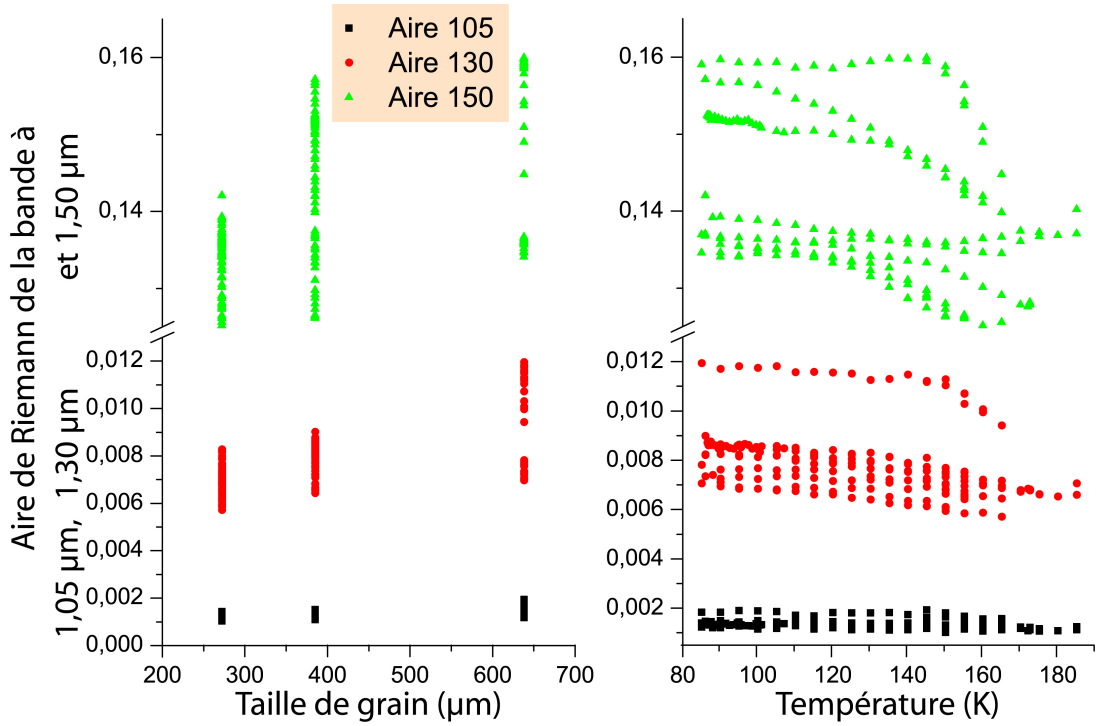


FIGURE IV.19 – Aire de Riemann des bandes à 1,05, 1,30 et 1,50 μm en fonction de la taille de grains et de la température.

IV.3.2 Signatures infrarouges du dioxyde de carbone et des clathrates de CO_2

Dans cette partie, les signatures infrarouges de la glace de dioxyde de carbone et des clathrates de CO_2 sont comparées. D'abord, des spectres à l'échelle microscopique de dioxyde de carbone, de clathrates de CO_2 et de dioxyde de carbone gazeux obtenus avec le matériel du laboratoire sont comparés. Puis, les études sur les bandes d'absorption autour de 2,7 μm sont présentées. Ce travail a examiné les caractéristiques spectrales à 2,7 μm avec des ajustements par des fonctions gaussiennes, d'une part, et par des calculs d'aires, d'autre part.

Le dioxyde de carbone et les clathrates

Les bandes d'absorption du dioxyde de carbone ne sont pas (ou que peu) visibles sur le spectre de clathrates. Les bandes autour de 1,40 et 2,00 μm ne sont quasiment pas observables. La figure IV.18a montre la bande à 2,00 μm. Une minuscule bande, dans le creux de la large absorption de l'eau à 2,00 μm, est visible sur le spectre de clathrates de dioxyde de carbone. En revanche, une bande d'absorption proche de 2,7 μm, figure IV.18b, est bien identifiable sur les spectres de clathrates contrairement à ceux de glace d'eau. Cette première bande d'absorption du dioxyde de carbone présente une double et forte absorption autour de cette longueur d'onde. Cependant, la position de cette bande semble décalée par rapport à celle du dioxyde de carbone solide et même gazeux. La figure IV.20a présente un exemple de spectres de clathrate de dioxyde de carbone à l'échelle microscopique, de dioxyde de carbone solide également à l'échelle microscopique et de dioxyde de carbone gazeux entre 2,55 et 2,88 μm. Le clathrate de CO_2 à l'échelle microscopique présente un minimum à 2,705 μm (pour des grains sans

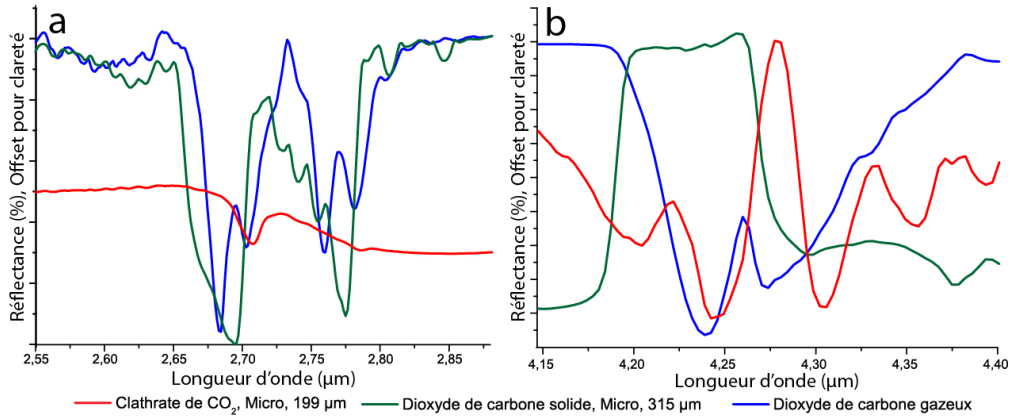


FIGURE IV.20 – Spectres d'échantillons microscopiques de glace de CO_2 (grain de 315 μm, à 80 K) et de clathrates de dioxyde de carbone (grain de 200 μm, à 115 K) et de dioxyde de carbone gazeux à 290 K. a) agrandissement entre 2,55 et 2,88 μm, b) agrandissement entre 4,15 et 4,40 μm.

pic de fresnel) et 2,711 μm (pour des grains possédant un pic de fresnel) alors que pour le dioxyde carbone solide, la bande d'absorption admet un minimum, à 2,694 μm ainsi qu'une inflection à 2,674 μm et le gaz possède une double absorption à 2,679 et 2,685 μm. Une deuxième absorption peut être observée autour de 2,785 μm pour les clathrates alors qu'elle est présente à 2,777 μm pour le CO_2 solide et qu'une double absorption autour de 2,758 μm et de 2,780 μm est identifiée pour le dioxyde de carbone gazeux. Les minima locaux ont été obtenus par dérivation. Le clathrate de CO_2 à l'échelle macroscopique présente une absorption à 2,707 μm pour des échantillons dont le pic de fresnel est bien marqué et à 2,706 μm pour des pics de fresnel plus faibles. Par ailleurs, la bande d'absorption autour de 4,2 μm peut être comparée à l'absorption présente dans les signatures du dioxyde de carbone solide et gazeux, figure IV.20b. Dans la signature de grains microscopiques de dioxyde de carbone, la réflectance est difficile à évaluer autour de 4,2 μm. Une forte réflectance, due à la présence du cuivre sous le grain peu épais, empêche de bien déterminer la position de cette absorption. Les minima d'ab-

sorption sont détectés à environ 4,258 μm pour le dioxyde de carbone microscopique, et une double bande est à 4,241 et 4,274 μm pour le gaz, (les valeurs sont déterminées par dérivation). Le clathrate, à l'échelle microscopique, montre également une absorption à 4,263 μm quand le spectre ne présente pas de (ou un faible) pic de Fresnel et à 4,260 μm quand le pic de Fresnel est visible. Cette bande est difficilement observable sur les échantillons macroscopiques dont le signal est confondu avec celui de la glace d'eau, figure IV.18c. Cependant, l'absorption est discernable chez les échantillons à gros grains (640 μm) à environ 4,266 μm et à petits grains (267 μm) à environ 4,267 μm. Toutes ces vibrations et celles dues au carbone 13 du CO_2 sont répertoriées dans la table de la section IV.3.5.

Caractéristique à 2,7 μm et les fonctions gaussiennes

Les bandes d'absorption à 2,7 μm du clathrate de dioxyde de carbone (figure IV.20) a été ajustée par la somme de deux gaussiennes. La figure IV.21 montre les résultats des caractéristiques des gaussiennes utilisées pour reproduire la bande à 2,7 μm des spectres expérimentaux. Cette étude ne révèle pas de dépendance en température ou en taille de grains de cette bande. Par ailleurs, la bande à 2,7 μm dans les spectres de dioxyde de carbone ne montrait pas non plus de dépendance en température ni en taille de grains. Les centres des gaussiennes, figure IV.21a, ne montrent aucune dépendance avec la température. La dispersion observée sur les positions des différentes gaussiennes est due aux différentes tailles de grains. Cependant, ces variations ne montrent pas de relation cohérente avec la taille de grains, non plus. Ainsi les positions des gaussiennes ne dépendent ni de la température, ni de la taille de grains. Les profondeurs et les aires, figures IV.21b et d, présentent des évolutions similaires avec la température. En dessous de 140 K, les profondeurs et aires des gaussiennes ne sont pas dépendantes de la tem-

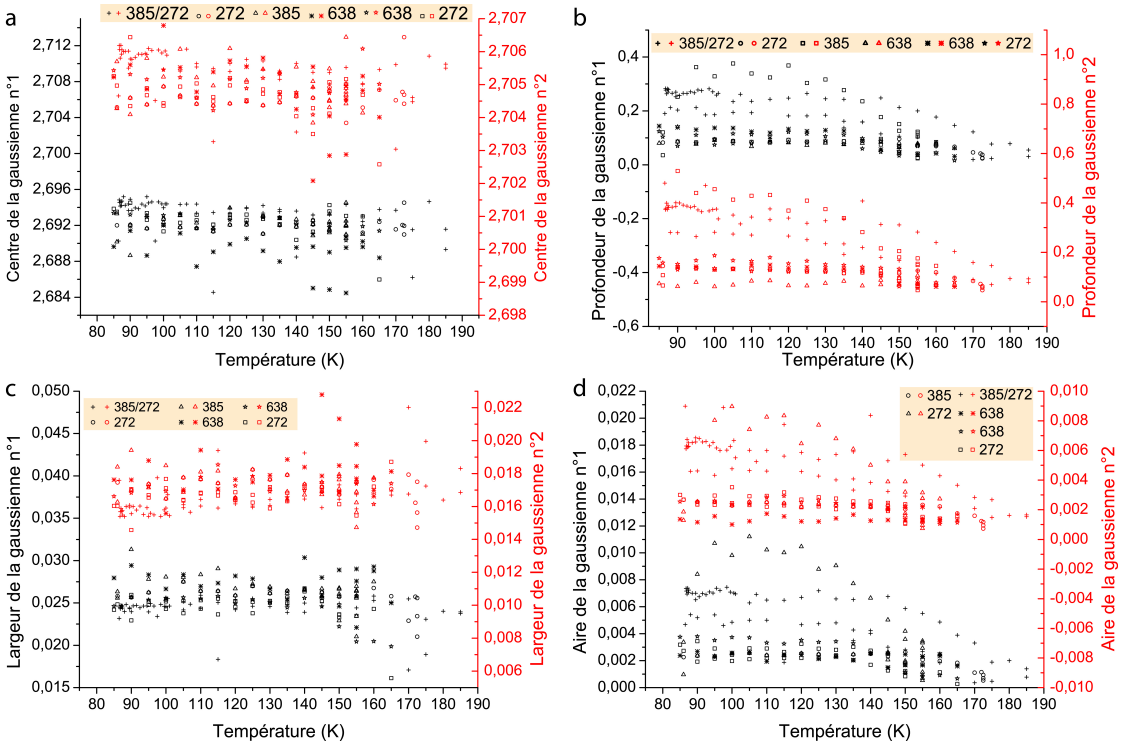


FIGURE IV.21 – Résultats des caractéristiques des gaussiennes dont la somme est représentative de la bande des clathrates à 2,7 μm. a) Position des centres des deux gaussiennes en fonction de la température. b) Profondeur des deux gaussiennes en fonction de la température. c) Largeur des deux gaussiennes en fonction de la température. d) Aire des deux gaussiennes en fonction de la température.

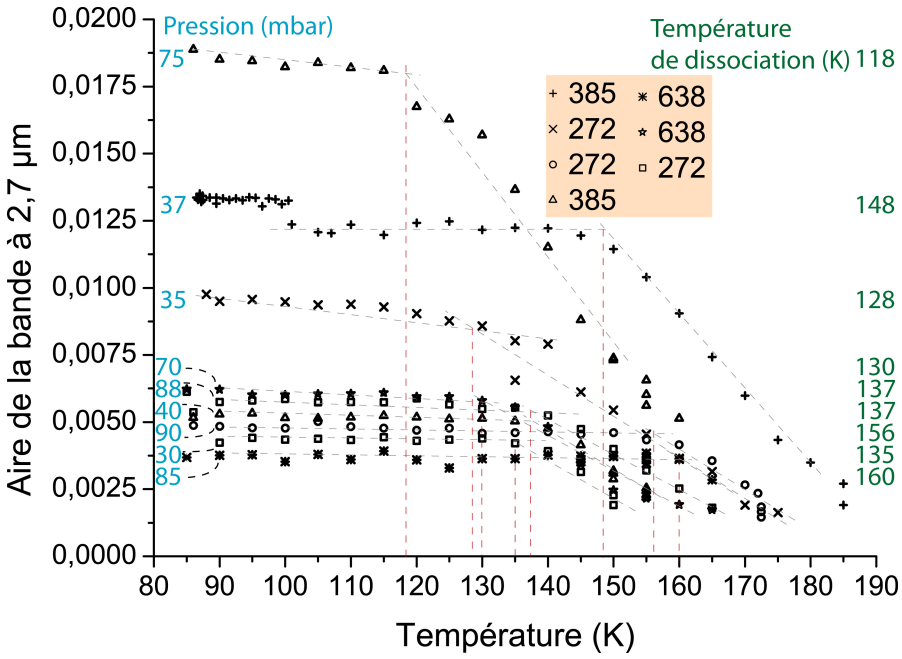


FIGURE IV.22 – Aire de Riemann de la bande à 2,7 μm en fonction de la température. La pression dans le cryostat lors des expériences est notée à titre indicatif, la jauge de pression n'est pas très précise entre 10 et 100 mbar (30 % d'erreur). Les températures de dissociation ont également été notées pour chaque échantillon.

pérature. Au dessus de 140 K, ces deux caractéristiques montrent une évolution linéaire décroissante. Cette évolution est produite par la dissociation des clathrates. Enfin, les largeurs des deux gaussiennes, figure IV.21c, ne dépendent pas non plus de la température, ni de la taille de grains.

Aire de la bande à 2,7 μm

La figure IV.22 présente les résultats obtenus sur le calcul de l'aire de Riemann de la bande à 2,7 μm. L'aire de la bande évolue faiblement jusqu'au croisement de la température de dissociation où l'aire diminue très fortement. Cette chute semble tout à fait attendue, puisqu'à la dissociation, le nombre de clathrates diminue en surface, et leur signature spectrale signe donc de moins en moins. La température de dissociation, ou de

début de dissociation des échantillons a été déterminée graphiquement à l'intersection de deux droites. Ces droites ont été calculées sur deux groupes de points d'une même expérience. Chaque groupe montrait une tendance linéaire.

Ainsi, les ajustements n'ont pas permis d'établir de relations évidentes entre les critères des gaussiennes, la température et/ou la taille de grains et les aires ne présentent pas non plus d'évolution claire mais la dissociation des clathrates en surface de l'échantillon est observable.

IV.3.3 Signatures infrarouges des glaces d'eau, de dioxyde de carbone et de leur mélange

Les ressemblances et différences qui existent entre les signatures spectrales des composants purs et des mélanges sont examinées dans cette partie.

La figure IV.23 présente les différents spectres entre 1 et 5 μm. La contribution de la glace d'eau est observable, sur les spectres noir et vert, à 1,5, 2, 3,1 et 3,6 μm (figures IV.23 (b), (c), (d), et (e)). Les positions et formes des bandes semblent identiques et non influencées par la présence du dioxyde de carbone pour le spectre noir. Le dioxyde de carbone, dont le spectre est en rouge sur la figure IV.23, est visible à 2,0 2,7 et 4,2 μm. Les absorptions du dioxyde de carbone ne semblent pas non plus perturbées par la présence de la glace d'eau. Le spectre noir représente donc la somme des contributions des glaces d'eau et de dioxyde de carbone. Chaque caractéristique spectrale de chaque constituant est observable et non influencée par la présence d'autres composants. Une étude numérique plus approfondie sur la comparaison entre la signature expérimentale et les mélanges linéaires/intimes pourra être envisagée dans l'avenir.

Les expériences préliminaires avaient montré la présence de dioxyde de carbone,

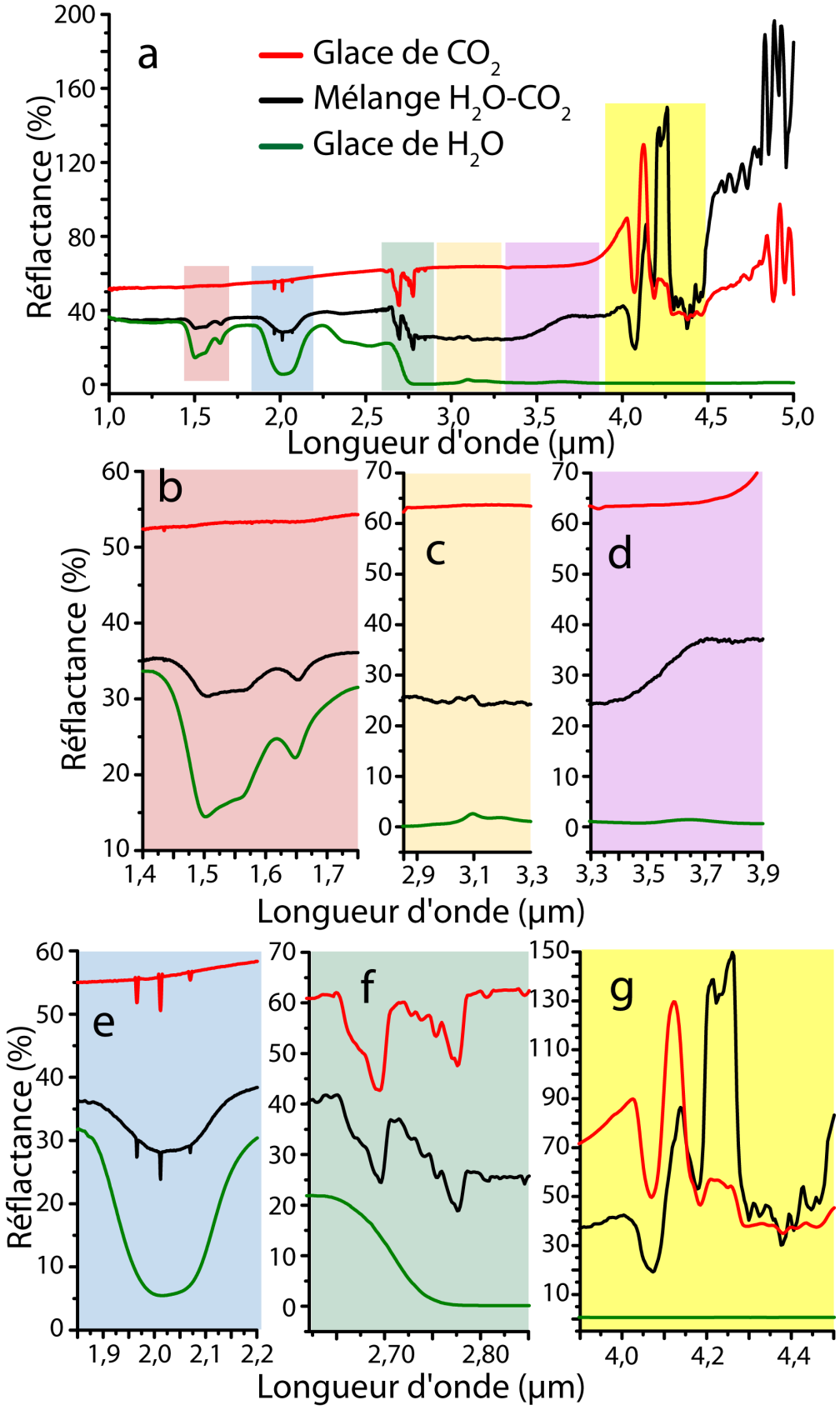


FIGURE IV.23 – Comparaison des spectres de glaces d'eau et de dioxyde de carbone pures et de mélange : a) entre 1 et 5 μm, b) entre 1,4 et 1,75 μm, c) entre 2,85 et 3,30 μm, d) entre 3,3 et 3,9 μm, e) entre 1,8 et 2,2 μm, f) entre 2,65 et 2,90 μm et g) entre 3,9 et 4,5 μm.

sans doute adsorbé sur la glace d'eau, après la sublimation du CO_2. Dans les expériences réalisées dans la cellule à atmosphère contrôlée, ce phénomène n'a pas été reproduit. L'interaction entre les solides formés par l'eau et le dioxyde de carbone, semble donc limitée. La formation de structures plus complexes, comme celle des clathrates de dioxyde de carbone, n'a pas été observée pendant ces expériences et demande sans doute plus de temps ou d'énergie. Par ailleurs, les expériences de laboratoire montrent que le mélange de deux composants est bien la contribution simultanée des caractéristiques spectrales propres de chacune des espèces pures.

IV.3.4 Signatures infrarouges des mélanges et des clathrates de CO_2

Cette partie compare les signatures spectrales des mélanges de glaces pures et des clathrates de dioxyde de carbone aux échelles microscopique puis macroscopique.

L'échelle microscopique

La figure IV.24 présente les spectres de clathrates et de mélange de glaces pures à l'échelle microscopique. Des agrandissements des différentes caractériques spectrales de l'eau et du dioxyde de carbone permettent une meilleure comparaison. Les positions des bandes du dioxyde de carbone dans le mélange des constituants sont identiques alors que celles dans le spectre de clathrate sont décalées (voir les tables IV.1 et IV.2). Les vibrations du mélange sont indiquées dans le tableau, section IV.3.5.

L'échelle macroscopique

La figure IV.25 présente les spectres de clathrates et de mélange de glaces pures à l'échelle macroscopique, ainsi que des agrandissements des domaines spectraux d'inté-

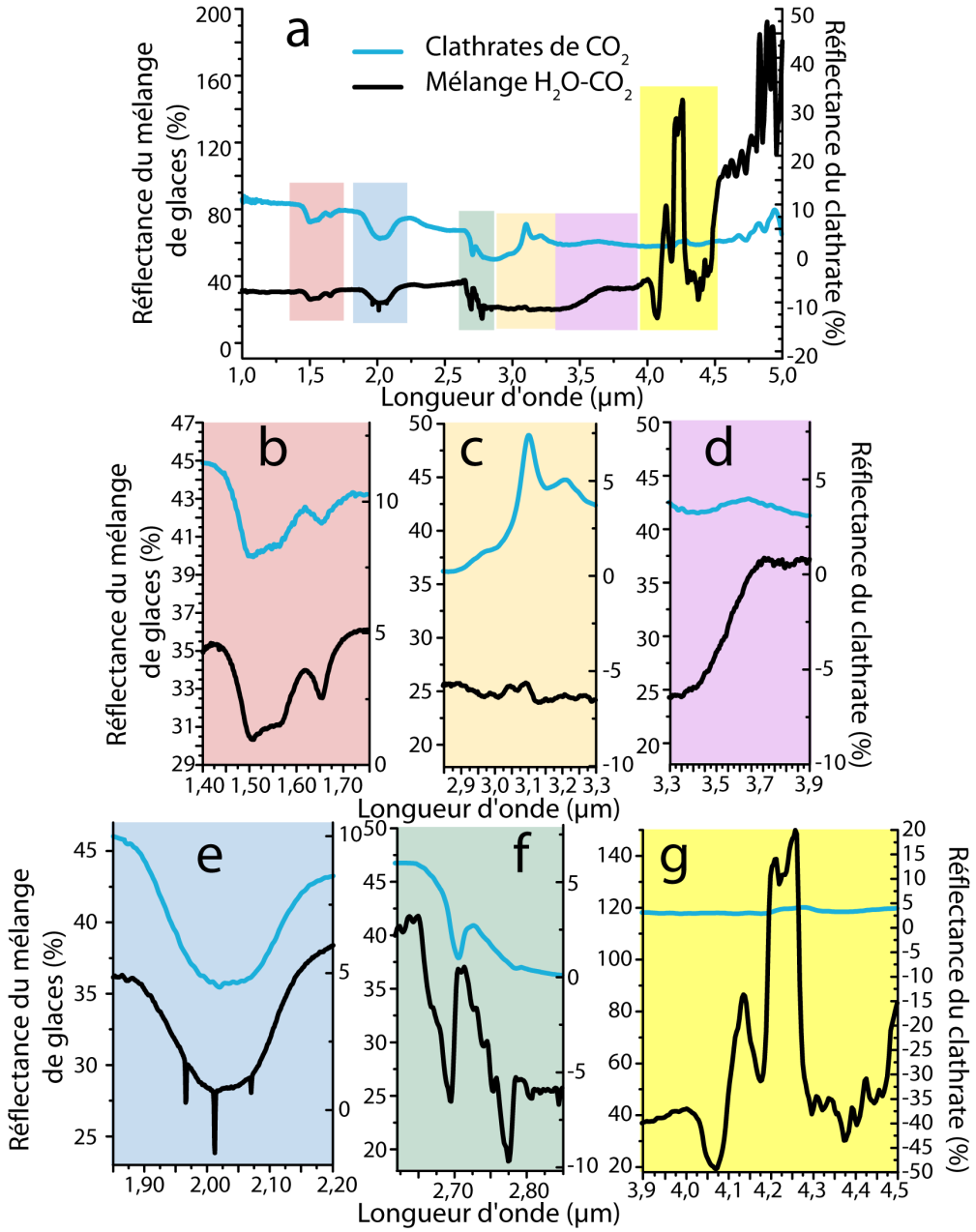


FIGURE IV.24 – Comparaison des spectres de mélange de glaces d'eau et de dioxyde de carbone pures et de clathrates à l'échelle microscopique : a) entre 1 et 5 μm, b) entre 1,4 et 1,75 μm, c) entre 2,85 et 3,30 μm, d) entre 3,3 et 3,9 μm, e) entre 1,8 et 2,2 μm, f) entre 2,65 et 2,90 μm et g) entre 3,9 et 4,5 μm.

rêt pour l'étude. Le dioxyde de carbone dans la structure clathrate montre des positions de vibrations différentes que celles dans la glace pure ou le mélange de glaces. Ainsi, la structure du clathrate contraint de manière différente la liberté de la molécule. Dans le clathrate, le dioxyde de carbone n'est ni solide, ni gazeux car ses vibrations sont à des longueurs d'onde différentes de celles des composants purs.

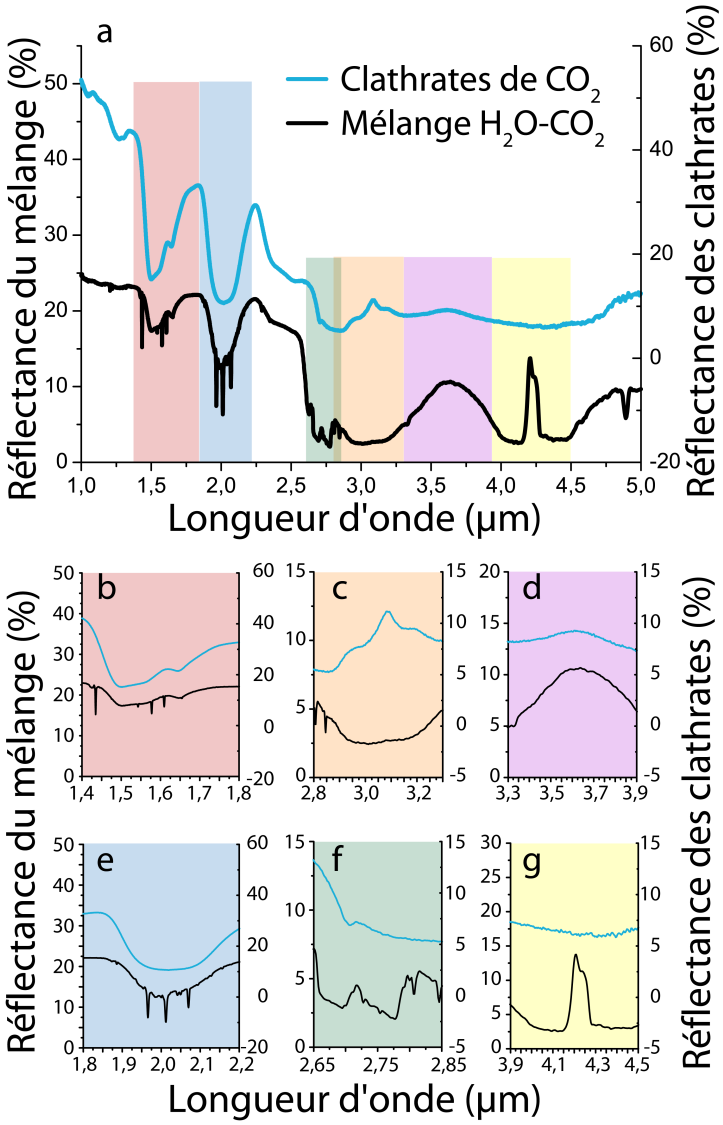


FIGURE IV.25 – Comparaison des spectres de mélange de glaces d'eau et de dioxyde de carbone pures et de clathrates à l'échelle macroscopique : a) entre 1 et 5 μm, b) entre 1,4 et 1,8 μm, c) entre 2,8 et 3,30 μm, d) entre 3,3 et 3,9 μm, e) entre 1,8 et 2,2 μm, f) entre 2,65 et 2,85 μm et g) entre 3,9 et 4,5 μm.

IV.3.5 Résumé des vibrations

Le tableau IV.1 est un résumé des longueurs d'onde de vibration des constituants étudiés dans ce chapitre. Les vibrations qui nous ont intéressés sont la combinaison des modes ν_1 et ν_3 à 2,7 μm, et le mode fondamental ν_3 de $^{12}CO_2$ et $^{13}CO_2$.

TABLE IV.1 – Longueurs d'onde de vibration des constituants étudiés dans ce chapitre

Vibration	Clathrate microscopique		Clathrate macroscopique	
	Avec pic de fresnel	Sans pic de fresnel	Avec pic de fresnel	Avec faible pic de fresnel
	310 μm, 107 K	350 μm, 200 K	272 μm, 85 K	640μm, 80 K
ν_1+ν_3	2,711	2,705	2,707	2,706
$^{12}CO_2$ ν_3	4,260	4,263	4,267	4,266
$^{13}CO_2$ ν_3	4,354	4,350	4,347	4,332
	CO_2 solide microscopique		CO_2 gazeux	
	310 μm, 80 K	230 μm, 85 K	290 K	
ν_1+ν_3	2,694	2,694	Double bande à 2,679 et 2,685	
$^{12}CO_2$ ν_3	4,258	4,259	Double bande à 4,241 et 4,274	
$^{13}CO_2$ ν_3	4,378	4,378	4,385	
	Mélange microscopique		Mélange macroscopique	
	103μm (H_2O), 77μm (CO_2), 135 K		80 K	
ν_1+ν_3	2,697		2,695	
$^{12}CO_2$ ν_3	4,258		4,229	
$^{13}CO_2$ ν_3	4,376		4,372	

TABLE IV.2 – Longueurs d'onde de vibration du dioxyde carbone gazeux, solide et piégé dans un structure clathrate de la littérature. Les positions de la bande d'absorption représentatives du dioxyde de carbone sur les satellites de glace sont indiquées pour comparaison.

Vibration	CO_2^{gaz}	CO_2^{solide}				Clathrates de CO_2
	Dartois et Schmitt (2009)	Dartois et Schmitt (2009) (4-21 K)	Gerakines et al. (1995) (60 K)	Sandford et Allaman-dola (1990) (80 K)	Gàlvez et al. (2008) (95 K)	Dartois et Schmitt (2009) (5,6 K)
ν_1+ν_3	2,692	2,697	2,697	2,697	2,697	2,700
$^{12}CO_2$ ν_3	4,257	4,268	4,268	4,268	4,264	4,261
$^{13}CO_2$ ν_3	4,379	4,381	4,380	4,382	4,382	4,403
Chaban et al. (2007)	CO_2 (80 K, laboratoire)	Ganymède	Callisto	Phoebe	Japet	Hypérion
$^{12}CO_2$ ν_3	4,2675	4,257	4,258	4,258	4,26	4,247

Ce chapitre a établi les protocoles expérimentaux des analyses de dioxyde de carbone solide et gazeux, des mélanges de glaces d'eau et de CO_2 et de clathrates de CO_2 aux échelles macroscopique et/ou microscopique. Les différentes signatures spectrales ont été présentées puis comparées les unes aux autres. La signature spectrale du mélange des glaces de dioxyde de carbone et d'eau expose les caractéristiques spectrales de chacun des constituants pures. Le clathrate de dioxyde de carbone, quant à lui, montre des différences notables sur les positions des bandes d'absorption du CO_2 par rapport aux absorption du dioxyde de carbone solide et gazeux. Ainsi, les caractéristiques spectrales du dioxyde de carbone piégé dans les cages du clathrates ne sont ni celles du CO_2 solide, ni celles du CO_2 gaz.

Chapitre V

Applications à la planétologie

Les études expérimentales réalisées sur les glaces d'eau et de dioxyde de carbone permettent de comparer les signatures spectrales des constituants purs avec les caractéristiques spectrales des spectres des surfaces des satellites de glace. Dans ce chapitre, les recherches expérimentales et numériques menées sur la glace d'eau ont été utilisées pour calculer la distribution en température et en taille de grains au pôle Sud d'Encelade. La deuxième partie de ce chapitre concerne les interprétations des caractéristiques spectrales du dioxyde de carbone sur les spectres des satellites de glace. La détection de ce constituant et son état physique à la surface des satellites de glace sont discutés.

V.1 La glace d'eau et Encelade

Le but de l'étude expérimentale, présentée au chapitre III, était d'établir une loi de dépendance de la signature spectrale de la glace d'eau avec la température et la taille de grains. Cette loi peut maintenant être appliquée à des spectres naturels de manière à retrouver la température et la taille de grains de l'objet analysé à partir de sa signature

spectrale. Cette section se découpe en quatre partie. D'abord, le traitement de cubes hyperspectraux est expliqué, ensuite, la projection des cartes issues du traitement est détaillée, enfin, les résultats obtenus sont discutés. La dernière partie est une publication soumise en septembre 2010 sur l'ensemble du travail réalisé sur la glace d'eau et l'application effectuée sur le pôle Sud d'Encelade.

V.1.1 Traitement des cubes

L'objet naturel choisi pour une première étude est un satellite de glace de Saturne, Encelade. Ce corps glacé est l'un des plus brillants, son albédo est très élevé, 0,81 selon Spencer et al. (2006). Très peu de contaminants sont présents à la surface, les spectres infrarouges de sa surface sont quasiment représentatifs de la glace pure. De plus, au pôle Sud d'Encelade, une anomalie thermique, produisant des panaches le long de quatre failles, appelées les « Tiger Stripes » (Porco et al., 2006), fait de ce satellite un objet privilégié pour ce test qui cherche à valider les lois sur la température et la taille de grains établies précédemment dans un contexte naturel. Le spectro-imageur VIMS, à bord de Cassini, permet l'acquisition d'image en infrarouge de la surface d'Encelade. Les images acquises sont très nombreuses, deux d'entre-elles couvrent les Tiger Stripes et feront l'objet de l'étude. Les deux images retenues sont CM_1500061286_1·cub et CM_1500061406_1·cub. Ces images ont été acquises pendant le survol de Cassini S12/EN111 le 14 juillet 2005. VIMS était à 20 000 km d'Encelade lors de l'acquisition et la résolution spatiale de ces images est de 5 à 10 km par pixel. Ces deux images couvrent quasiment la totalité du pôle Sud. Chaque pixel d'une image contient la signature spectrale de la zone analysée. Malheureusement, certaines parties de la signature spectrale des cubes sont saturées ou très bruitées. Pour appliquer la procédure de

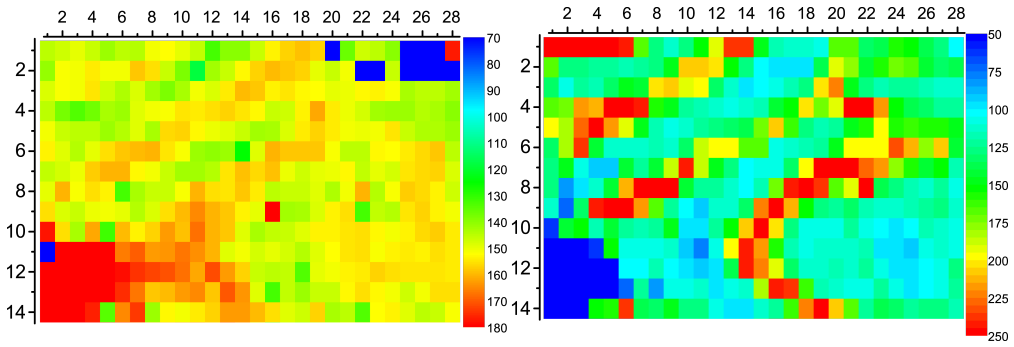


FIGURE V.1 – a) Carte de distribution en température de l'image CM_1500061286_1·cub. b) Carte de distribution en taille de grains de la même image VIMS.

traitement sur les spectres de l'image, un programme a été élaboré sous IDL 4.7 pour extraire l'information spectrale de chaque pixel en colonne. Ensuite, ces spectres ont été traités avec le programme de calcul de température et de taille de grains sous Fortran. Comme les aires des spectres expérimentaux ont été normalisées par des aires de spectres dont les échantillons étaient proches de 140 K et 210 μm, les aires des spectres naturels doivent à leur tour être normalisées par des aires issues d'un spectre de référence. D'après Jaumann et al. (2008) et Spencer et al. (2006), la taille de grains et la température près de Tiger Stripes est proche de 200 μm et 130 K. Un pixel proche des Tiger Stripes de coordonnées (6 ; 3) a donc été choisi pour référence. Deux matrices, représentatives des valeurs de température et de taille de grains à chaque pixel, sont ainsi obtenues. Les matrices sont mises en forme sous Origin Pro©. Les cartes de températures et de taille de grains peuvent alors être dessinées. La figure V.1 présente les deux cartes de distribution en taille de grains et en température issues des lois III.1, III.3 et III.4 établies dans la section III.2. La carte de distribution en taille de grains montre que les grains de glace d'eau sont plus gros au niveau des Tiger Stripes. Les valeurs de tailles de grains obtenues sont comparables à celles calculées par Jaumann et al. (2008).

La carte de distribution en température montre des variations de température autour des Tiger Stripes.

Par ailleurs, lorsque l'imageur VIMS acquiert des données, les coordonnées géométriques sont également repérées et conservées dans des fichiers de navigation. Les images VIMS peuvent donc être projetées sur le système de coordonnées d'Encelade, en utilisant une carte ISS en fond.

V.1.2 Projection des cartes de distribution en T et D

Pour une meilleure lisibilité de l'information et plus particulièrement, pour ajouter l'information spatiale aux cartes précédemment calculées, un programme de projection a été élaboré en collaboration avec M. Giraud, ingénieur au LPGN.

Une carte de l'instrument ISS (Imaging Science Subsystem, caméra visible à bord de Cassini) a été choisie comme fond sur lequel les cartes de température et de taille de grains vont être projetées. La dernière carte publiée date de 2008 (Roatsch et al., 2008). C'est une recombinaison de 377 images haute résolution (moins d'un kilomètre par pixel). Le livre « *Saturn from Cassini* » fournit un CD-ROM dans lequel la carte très haute résolution d'Encelade de Roatsch et al. (2008) est disponible. La figure V.2 est la carte utilisée pour les projections.

La projection des images VIMS sur la carte ISS montre un décalage d'un pixel en diagonale. En effet, la figure V.3 présente trois cartes, deux en deux dimensions et une en projection sur la carte ISS. La carte V.3a est un composé couleur RVB sur trois bandes d'un cube hyperspectral VIMS (CM_1500061286_1·cub) de manière à observer la position des Tiger Stripes sur les parties rouges-marron. La position des pixels est également reportée. La carte V.3b est une carte identique à la précédente pour la position

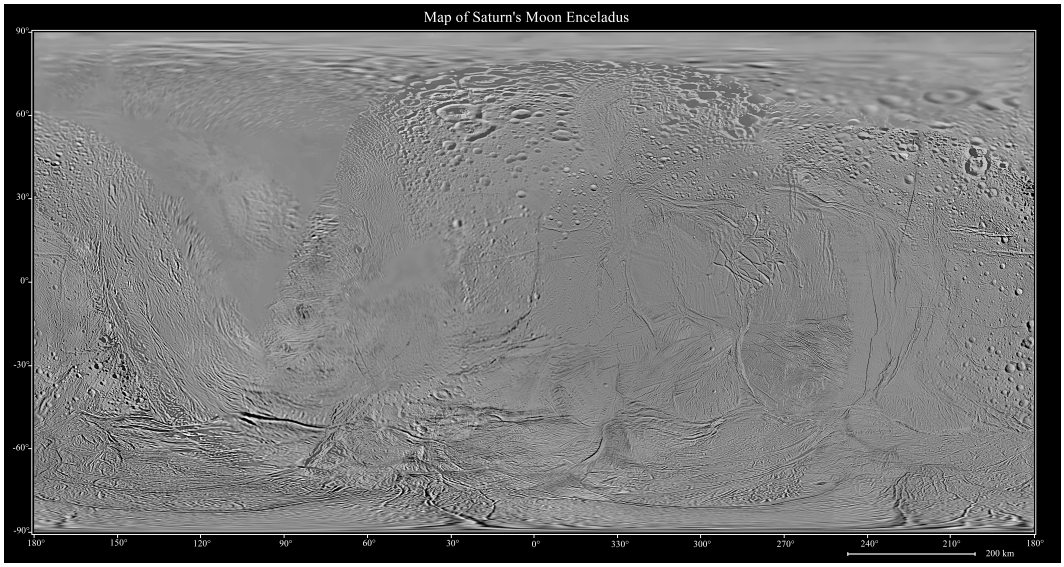


FIGURE V.2 – Carte ISS d'Encelade, 110 m par pixel. D'après Roatsch et al. (2008).

des pixels. La distribution en taille de grains y est représentée. Cette carte montre que la taille des grains de glace d'eau sont plus importants au niveau des Tiger Stripes.

Chaque pixel, acquis sur (ou proche) des Tiger Stripes, est marqué d'une croix bleue sur les trois cartes. La dernière carte est une projection d'une carte de répartition de la température sur la carte ISS d'Encelade. Les croix bleues montrent la position des Tiger Stripes sur l'image VIMS et les traits en pointillés, la position des Tiger Stripes sur la carte ISS. Le décalage doit être dû à la différence de pointage entre les deux capteurs ISS et VIMS. Une correction est donc appliquée sur les données de navigation des cartes VIMS par rapport à la carte ISS d'un pixel en diagonale.

Ainsi, après cette simple correction des données de navigation, des cartes de températures (figure V.4) et de tailles de grains (figure V.5) cohérentes sont obtenues.

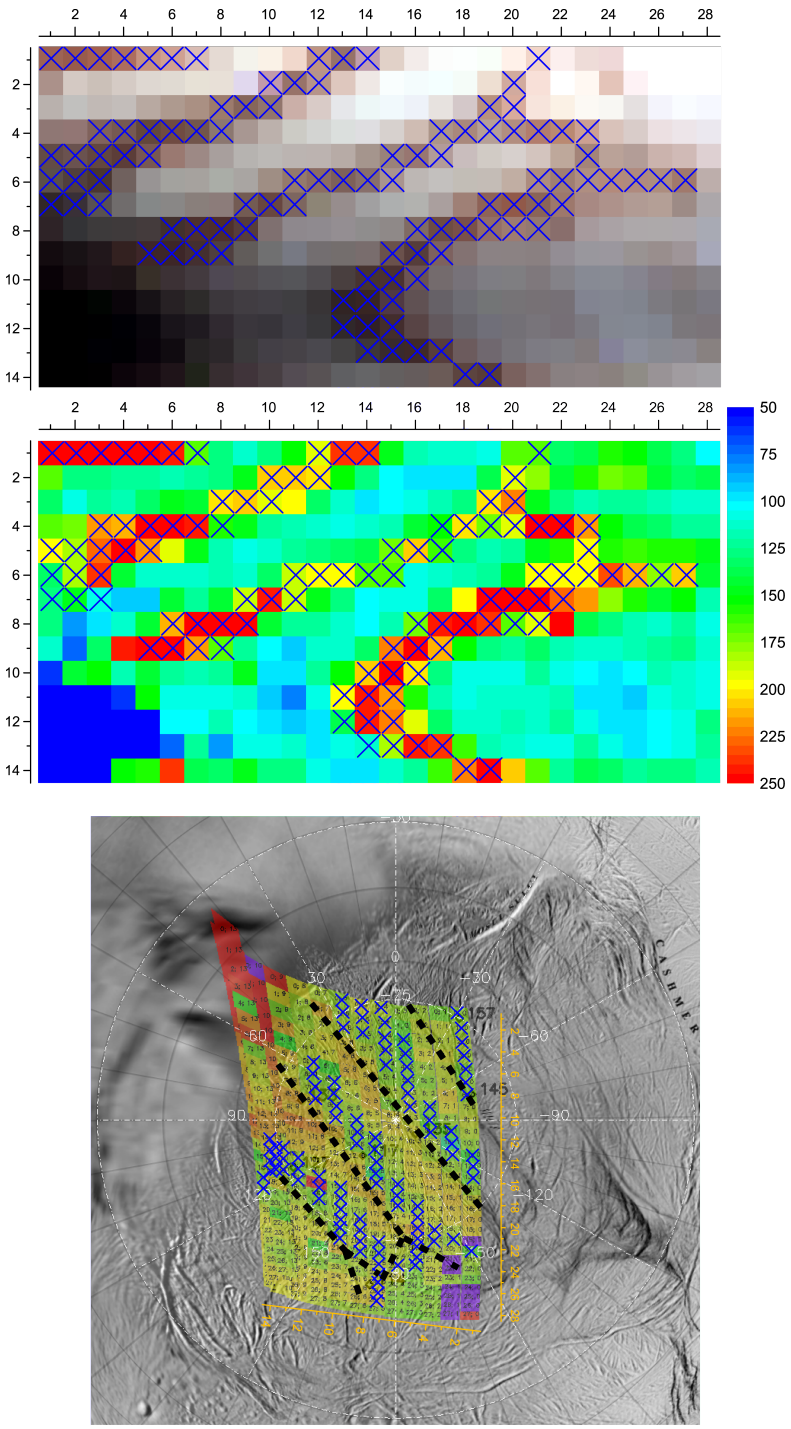


FIGURE V.3 – a) Image issue du cube hyperspectral CM_1500061286_1·cub. Le composé couleur est réalisé à partir des bandes 125, 135 et 165 ; soit 1,3432, 1,5079 et 2,0017 μm. Les zones rouges-marron correspondent aux acquisitions sur ou proches des Tiger Stripes. Pour plus de clarté, ces pixels ont été marqués d'une croix bleue. Les barres d'échelle représentent les numéros des pixels. b) Carte de la distribution en taille de grains selon la même grille de pixels que l'image a. La position des Tiger Stripes est reportée grâce aux croix bleues. Les couleurs de la carte de taille de grains montrent que les grains de glace sont plus gros au niveau des Tiger Stripes, ce qui a déjà été remarqué par Jaumann et al. (2008). c) La carte en deux dimensions a été projetée, grâce aux informations des fichiers de navigation, sur la carte ISS présentée dans la figure V.2. Les croix bleues ont été reportées selon les coordonnées des pixels. Un décalage d'un pixel en diagonale est remarqué entre les croix bleues qui représentent les Tiger Stripes sur les pixels et les traits en pointillés qui sont les Tiger Stripes sur la carte ISS.

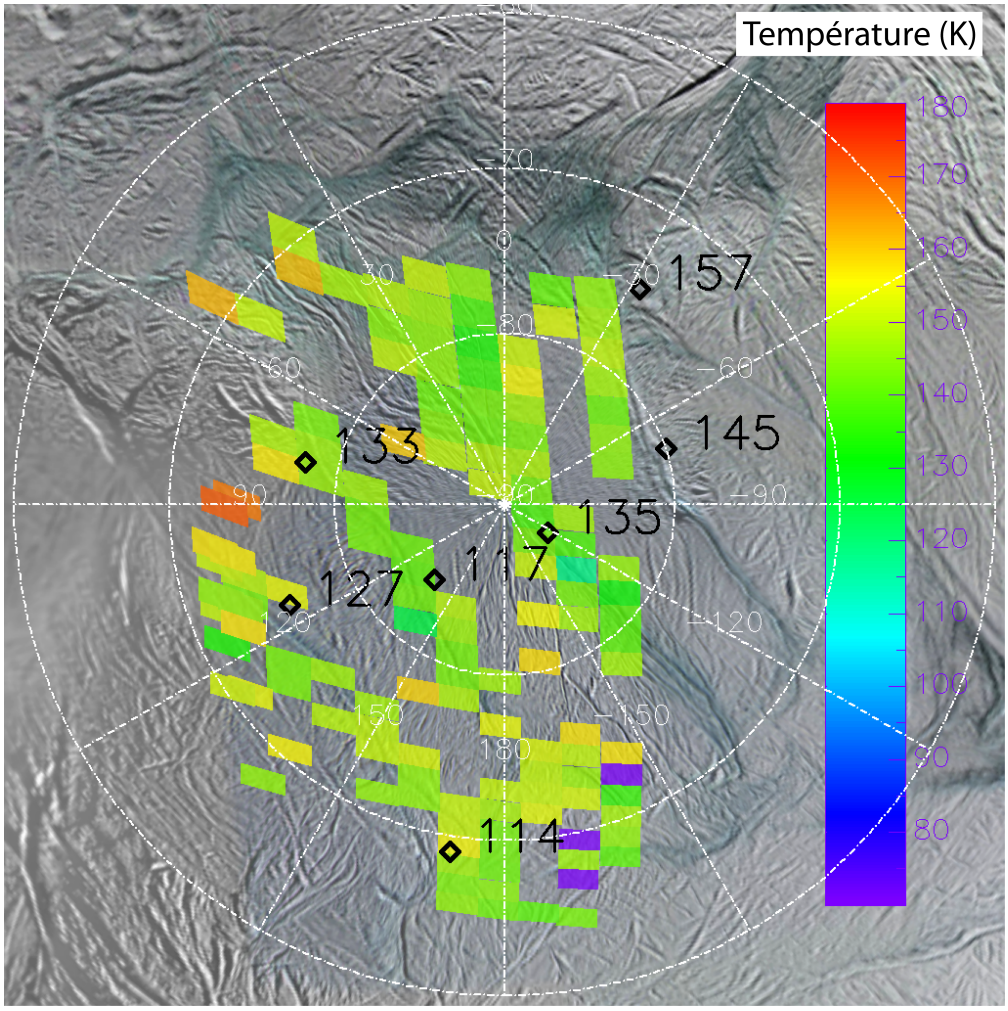


FIGURE V.4 – Carte de température du pôle Sud d'Encelade obtenue par des calculs relatifs aux aires réduites des spectres. Les points de température en noir sont issus des données de Spencer et al. (2006).

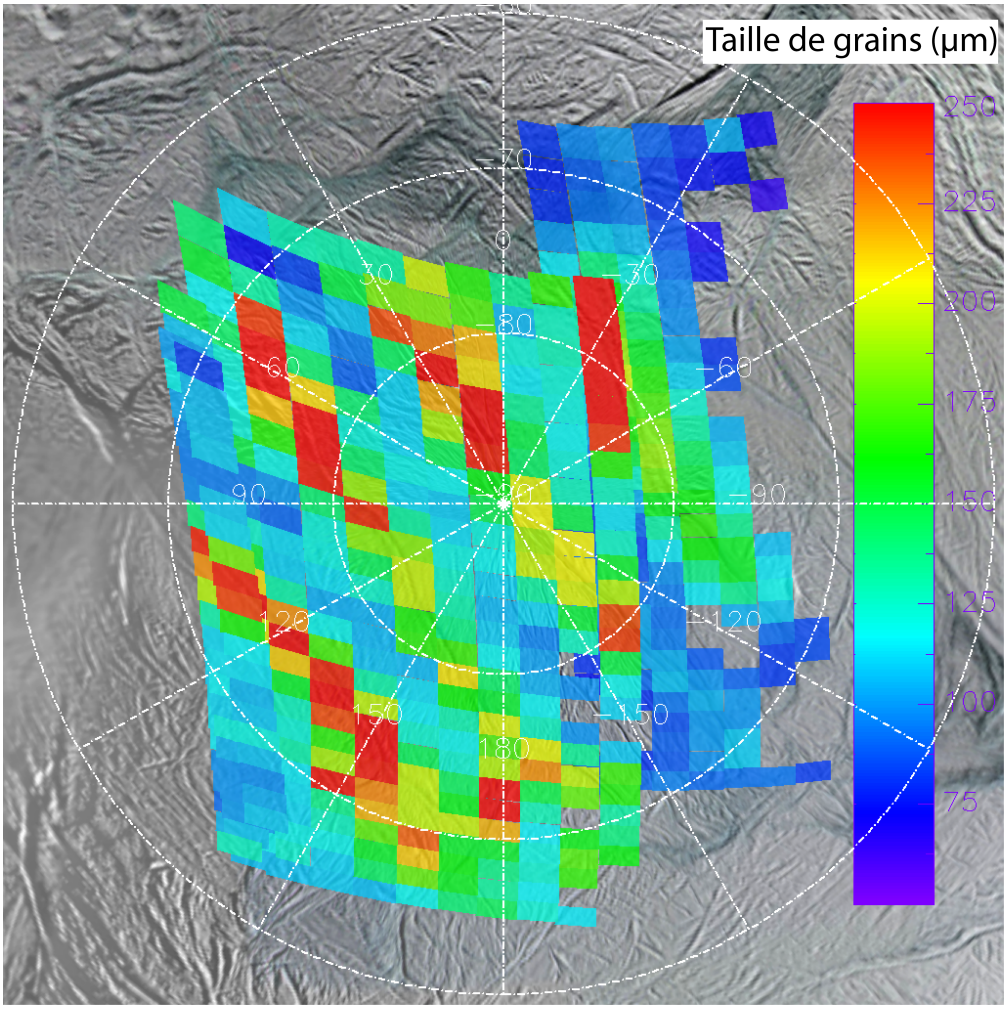


FIGURE V.5 – Carte de taille de grains du pôle Sud d'Encelade obtenue par des calculs relatifs aux aires et aires réduites des spectres.

V.1.3 Discussion sur les résultats

Les cartes issues de ce travail sont cohérentes avec la littérature. En effet, les données de température montrent une température moyennée sur 25 km^2 d'environ 120 à 160 K. Ce résultat est cohérent avec les données publiées par Spencer et al. (2006) et Abramov et Spencer (2009). Les symboles en losanges noirs sur la figure V.4 indiquent la position des points de données publiés par Spencer et al. (2006) qui ont été obtenus à partir des mesures d'émission thermique du « Composite InfraRed Spectrometer » (CIRS). Les résolutions de CIRS et de VIMS sont équivalentes sur la majorité de ces données, *i.e.* à peu près 5 à 10 km par pixel. Sur la carte de distribution en température, l'image hyperspectrale VIMS, CM_1500061406_1·cub, n'a pas été projetée car les données spectrales autour de la bande à 1,30 μm sont très saturées et donc non exploitables pour le calcul de la température. Par ailleurs, tous les pixels ne sont pas projetés sur les cartes. En effet, des filtres ont été programmés pour enlever les pixels dont l'angle d'incidence serait supérieur à 90° ce qui correspond au côté nuit du corps observé et ceux dont l'albédo serait trop élevé, ce qui génère des données saturées. Un autre filtre a été appliqué sur la carte de température. Ce filtre est un facteur de cristallinité. En effet, la température est très sensible à la nature de la glace, ce qui avait déjà été constaté dans le travail expérimental. Le facteur de cristallinité qui a été appliqué sur la carte de température est uniquement lié à la réflectance du pic de Fresnel. Les pixels entre les Tiger Stripes ne sont donc pas dessinés puisqu'ils ne représentent pas des spectres de glace d'eau cristalline mais de glace amorphe. Par ailleurs, Newman et al. (2008) a montré grâce aux signatures spectrales de VIMS qu'une partie de la glace à la surface d'Encelade avait été amorphisée par des ions ou des électrons de haute énergie en provenance de la magnétosphère de Saturne. En particulier, la glace d'eau, située entre les Tiger Stripes,

est de la glace amorphe, d'après ses calculs. Cette hypothèse correspond à nos résultats. En effet, si on applique notre loi sur ces pixels, la température obtenue est supérieure aux températures obtenus sur les Tiger Stripes. Ce n'est pas une erreur de calcul, les spectres de glace amorphe présentent des bandes d'absorption différentes de celles de la glace cristalline. Les bandes d'absorption sont plus larges et moins profondes. Ces caractéristiques sont représentatives d'une glace cristalline plus chaude pour notre loi. Ainsi, les pixels dont les spectres représentent de la glace amorphe ne peuvent pas être reporté sur la carte de température dont l'évaluation n'est valable que sur de la glace cristalline.

La carte de taille de grains réalisée sur les deux images, CM_1500061286_1·cub et CM_1500061406_1·cub, est en accord avec les données publiées par Jaumann et al. (2008). Dans leur travail sur les profondeurs de bandes de spectres modélisés, ils estimaient la taille de grains de la glace sur les Tiger Stripes à environ 200 μm. Notre étude se base sur l'aire de la bande à 1,50 μm et sur les aires réduites des bandes à 1,30 et 1,50 μm du spectre de glace d'eau cristalline. Le calcul de taille de grains n'est pas affecté par la saturation de l'image hyperspectrale CM_1500061406_1·cub autour de la bande à 1,30 μm et confirme le résultat de Jaumann et al. (2008) en obtenant une valeur de 200 à 250 μm sur les Tiger Stripes. Les calculs de Jaumann et al. (2008) montrent que la taille de grains diminue fortement quand on s'éloigne des zones chaudes du pôle Sud et passe de 200 μm à 50 μm. Les valeurs que nous obtenons sont plus élevées (250 μm sur les Tiger Stripes et 100 μm entre les failles) mais elles restent comparables aux valeurs de Jaumann et al. (2008). Des filtres ont également été appliqués sur les cartes pour retirer les pixels sur les parties « nuit » des images et les pixels dont les données sont saturées. Aucun filtre sur le pic de Fresnel n'a été appliqué sur la carte de distribution en taille de grains.

Ainsi, les lois obtenues dans ce travail ne sont applicables que sur des spectres de glace d'eau pure cristalline. Aucune étude expérimentale n'a été réalisée sur de la glace amorphe au laboratoire.

L'ensemble des expériences, les procédures numériques et l'application planétologique à Encelade a été soumis pour une publication. La dernière partie de cette section est l'article correspondant.

V.1.4 Résumé : Publication

Cette partie inclut un article scientifique soumis à PSS, en septembre 2010. Cet article traite de l'élaboration de la loi de dépendance de la signature spectrale de la glace d'eau avec la température et la taille de grains, ainsi que de l'application de cette loi au pôle Sud d'Encelade. Le contenu de cet article a été décrit plus précisément dans les chapitres II et III et la partie précédente.

Experimental study of water ice IR signature dependence with temperature and grain size. Application to Enceladus.

Cécile Taffin[1], Olivier Grasset[2], Erwan Le Menn[1], Olivier Bollengier[2], Manuel Giraud[1] and Stéphane Le Mouélic[1]

[1]Laboratoire de Planétologie et de Géodynamique de Nantes, Université de Nantes, Nantes Atlantique Universités, CNRS, 2 rue de la Houssinière, 44322 NANTES, – France

[2]Université de Nantes, Nantes Atlantique Universités, Laboratoire de Planétologie et de Géodynamique de Nantes, Nantes, F-44000 France

Corresponding author : Cécile TAFFIN

2, rue de la Houssinière BP 92208
44322 NANTES Cédex 3 – France
cecile.taffin@univ-nantes.fr

Tél. : 33 (0)2 51 12 54 67

Fax : 33 (0)2 51 12 52 68

Abstract

An experimental facility has been set up to acquire infrared spectra of pure water ices with controlled grain sizes and temperatures ranging from 80 to 140 K in vacuum. Forty seven near IR spectra (1.0 – 5.0 μm) have been acquired in order to determine how spectral characteristics (between 1.0 and 1.8 μm) depend on both grain size and temperature. It will be shown that the spectral characteristics based on Gaussian fits cannot be used as temperature or grains size indicators. But the area of the 1.5 μm absorption band is strongly correlated to the grain size. A logarithmic scaling law has been proposed for grain sizes lower than 200 μm and a linear law is needed to account for grains bigger than 200 μm. In order to quantify properly the temperature effect relative to grain size, the computation of two reduced band areas within 1.240 - 1.344 μm and 1.486 - 1.691 μm must be achieved. Using these new laws, we argue that near-IR spectra of crystalline water ice can be used to determine both temperature and grain size of icy surfaces with average accuracies of 10 K and 25 μm, respectively. This method has been tested against the VIMS spectral images of Enceladus' south pole. Both grain size distribution around the Tiger Stripes area and temperature anomalies along the stripes have been determined, in good agreement with previous studies.

Keywords

Experimental study, infrared spectroscopy, water ice, temperature dependence, grain size dependence, Enceladus

I. Introduction

Infrared spectroscopy has been used to study planetary bodies for more than 50 years. Kuiper (1957) discovered water ice on Europa and Ganymede using an infrared detector. Later, the Voyager 1 and 2 spacecrafts were launched to explore the giant planet's systems. The Voyager's Infrared Spectrometer (IRIS) obtained thermal spectra throughout each planetary flyby. The instrument was devoted primarily to atmospheric observations, but it acquired numerous thermal spectra of Saturn's ring system. In 1989, Galileo was launched towards Jupiter to explore in details the giant planet and its moons. Galileo mapped the surface ices and minerals on the Galilean satellites at a spatial resolution of 5 to 30 km, using both a multispectral camera (SSI) and an infrared spectrometer (NIMS). NIMS was the first infrared imaging spectrometer to analyse a giant planet atmosphere and the surface composition of its icy moons (Carlson *et al.*, 1992). A second generation instrument, the Visual and Infrared Mapping spectrometer, (VIMS), is currently operating onboard Cassini spacecraft around Saturn. Its spectral range, coupled with its high spectral resolution, allows to study the composition of saturnian icy moons (Brown et al., 2004, Dalton *et al.*, 2010) and to investigate the physical state (mainly grain size and degree of cristallinity) of the surface materials (Brown *et al.* , 2006, Jaumann *et al.*, 2008, Newman *et al.*, 2008).

Water ice is the most abundant compound detected at the surface of the moons. Its spectral characteristics have been extensively studied, especially in the near-IR domain from 1.00 to 2.5 µm (Bertie and Whalley, 1967 ; Fink and Larson, 1975 ; Clark, 1981a, 1981b ; Hagen and Tielens, 1983 ; Clark *et al.*, 1983 ; Clark and Lucey, 1984 ; Nolin and Dozier, 1993 ; Smith *et al.*, 1994 ; Painter *et al.*, 1998 ; Schmitt *et al.*, 1998 ; Grundy and Schmitt, 1998 ; Hansen and McCord, 2004 ; Mastrapa and Brown, 2006 ; Mastrapa *et al.*, 2008). Figure 1 displays a modeled infrared spectrum of water ice from Cruikshank *et al.*, (1998). This spectrum has been obtained from optical constants of Warren (1984) for a 100 µm grain size. The spectral range of VIMS is indicated in the figure. The temperature dependence of the 1.65 µm absorption band had been studied by Fink and Larson (1975), who noticed the dependence on temperature of the 1.65 µm / 1.5 µm area ratio (6056 cm^{-1} / 6600 cm^{-1}). Their experimental work concluded on the dependence of the water ice spectrum on temperature. Several models studied this temperature dependence, mainly by using optical constants of water ice (Grundy and Schmitt, 1998, Schmitt *et al.*, 1998, Mastrapa *et al.*, 2008, Mastrapa *et al.*, 2009). Leto *et al.* (2005) confirmed that the 1.65 µm absorption band can be used as a thermal probe to derive the surface temperature of planets. Finally, Mastrapa *et al*. (2008) published detailed data on the position of absorption bands from 1.1 to 2.6 µm depending on the temperature. However, water ice spectra depend on grain size too. The 1.05, 1.30 and 1.50 µm bands have been also studied for their grain size dependence. The grain size dependence of IR spectral characteristics has been first studied experimentally by Clark (1980, 1981a, 1983), and Clark and Lucey (1984). Nolin and Dozier (1993)

gave a model of the grain size dependence and Painter (1998) used hyperspectral measurements to study the size of snow grains. Nolin and Dozier (2000), using hyperspectral observations, also established a law which describes the grain size dependence. In particular, they studied the grain size dependence of the area of the 1.05 μm band. Moreover, Hansen and McCord (2004) performed a model to calculate albedo spectra of crystalline water snow using optical constants with the delta-Eddington two-stream model described by Wiscombe and Warren (1980). This model has been used by Jaumann et al. (2008) to map the distribution of grain size on Enceladus' surface.

(Figure 1)

In this work, we study near-infrared spectral signatures of crystalline water ice using well constrained experimental data. The first objective is to constrain the relative influence of grain size and temperature on the IR characteristics of ice spectra using *in situ* experiments carried out in planetological conditions (vacuum). IR spectra are acquired *in situ* using a Fourier transform infrared spectrometer coupled to a liquid nitrogen cryostat. The IR properties of water ice are investigated in the 1.0-1.8 μm domain, which corresponds to a part of spectral range of the VIMS imaging spectrometer. We focus in particular on the five absorption bands at 1.05, 1.30, 1.50, 1.55, and 1.65 μm, which are sensitive to temperature and grain size. The 2 μm absorption band is not used because of its rapid saturation with grain size. The absorption bands near 1.05 and 1.30 μm are very shallow whereas the absorption at 1.5 μm is broad, with secondary narrow absorption features at 1.55 and 1.65 μm in the right side of the broad 1.5 μm absorption band (figure 1).This domain is particularly sensitive to grain size and temperature. In the first section, the experimental set up and the procedure of data acquisition are described. Results of our experiments are given in the second part. The goal is to propose from these experiments new approaches for retrieving from IR spectra the grain size and temperature values on icy surfaces, as well as rough estimate of the expected accuracy of these methods. This will be presented in the third part. Finally, an application of this work is proposed in the last section where our laws are applied to VIMS data to derive the grain size and temperature of the ice at the South pole of Enceladus. It will be shown that these new results are very consistent with previous studies, but allow for a more robust determination of the surface characteristics of icy moons in the future.

II. Temperature and grain-size dependence of near-IR signatures of water ice: experimental results

II.1. Experimental set-up

Samples are constituted of many pure crystalline water ice grains. They are produced in two different ways: i) liquid water is condensed on a cooled metal plate, crushed at a pre-defined grain size, and then introduced in the cryostat (these samples will be later refered as “ice type” sample), or ii) water vapor is deposited on a cooled metal plate (refered as “Frost type” sample). The grain size is controlled using sieves (see Table 1) for ten experiments (“Sieved” icy sample). For fourteen other experiments, grains had not been sieved and the grain size had been estimated by calculation from sieved ice sample (see Table 2). For sieved icy samples, the grain size is more constrained but the dispersion is still quite large (up to 100 microns in standard deviation).

In all experiments, a liquid nitrogen cryostat (MicrostatN, Oxford Instruments) is used to control temperature and pressure. The vacuum into the cryostat is generated by a rotary vane vacuum pump (Pascal 2005 SD, Alcatel vacuum technology) linked to a sorption trap to be free of oil backstreaming (BOC EDWARDS, FL20K FORELINE TRAP). The pressure gauge is a Pirani vacuum meter (model VSP521, Thyracont) placed on a tee vacuum plug near the cryostat, which provides a pressure measurement in the range between 10^{-2} and 20 mbar with an accuracy better than ± 10%. The temperature is measured with a platinum resistance (PT100, class A) placed below the sample holder. A temperature controller (ITC601, Oxford instruments) displays the sample temperature during experiments and permits to stabilize this temperature by PID (Proportional Integral Derivative) loop feedback. Then, the sample temperature accuracy changes from +/-0.3 at 80 K to +/- 0.1 at 120 K. In order to place the sample precisely into the mirror’s focal point of the IR spectrometer and to get the highest SNR, a parabolic mirror has been developed. Sample are loaded into a sample holder (5 mm thick, 7.6 mm in diameter) in a cool chamber at 250 K to avoid atmospheric pollutions. The visual observation is not available *in situ* during these experiments. However, icy grains can be photographed using an optic microscope in the cool chamber.

II.2. Data Acquisition

The purpose of this experimental study is to investigate the dependence of water ice infrared spectra with temperature and grain size. In order to get this information as accurately as possible, the following procedures have been used :

Near Infrared Spectra - The near-IR signatures of icy samples have been obtained with a Fourier Transform Infrared Spectrometer (*Nicolet 5700*). This study is devoted to the narrow domain between 1.00 and 1.8 μm where most interesting absorption bands of water ice are detected. *In situ*

infrared signatures of macroscopic samples are investigated using a CaF_2 beamsplitter and an DTGS detector. The roughness of samples being significant, smooth gold discs such as those commonly used for specular reflectance studies, cannot be retained. An Infragold© rough gold foil (Klima and Pieters, 2006) developed by Labsphere© has been used instead.

Temperature – For each IR spectra, the temperature is controlled using the thermocouple placed close to the sample. The temperature measurement accuracy is always lower than one degree (table 2). Five experiments upon twenty four show an initial temperature accuracy of 7 K, due to a technical problem (table 2). The corresponding temperatures have been recalculated after the experiments. The experimental procedure consists in the acquisition of IR spectra of icy samples from 80 to 180 K every 10 K. Initial and final temperatures of each experiment are detailed in the table 2. The thermal equilibrium was obtained after waiting at least ten minutes at each temperature step.

Grain size – The procedure used to determine the grain size depends on the loading protocol. The grain size of sieved icy samples has been precisely evaluated using microscopic photographies. After sample loading, icy grains have been photographed and directly measured (figure 2a). The grain size of a given sample (shown in table 2) which will be used in the study corresponds to the mean grain size of measured grains. As an example, the statistical distribution of the grain size for the sample 17022010 (Table 2) is displayed in figure 2b. The final distribution slightly differs from what could be expected from the sieves characteristics only. This can be easily explained by the fact that we do not control the orientation of the grains during the sieving process.

(Figure 2)

Table 1 shows the seven sieves intervals used for the icy sieved samples. Dimensions in the first column are the grid side of the sieves, the second column is the expected dimension of icy grain. This result is the mean between the grid side of the smaller sieve and the grid diagonal of the longer. The third column is the number of measures. Figure 2a displays examples of measures calibrated using a micrometer on a microscope. The fourth and fifth columns in table 1 are the grain mean dimensions and the associated standard deviation obtained from the statistical study. No photography had been taken for the icy sample sieved between 100 and 180 μm. However, the statistical mean grain size and its standard deviation had been estimated from other measurements of sieved samples.

Sieves size (μm)	Expected mean dimension (μm)	Number of measurements	Statistical grain size mean (μm)	Standard deviation on the mean grain size (μm)
60-100	105	541	78.09	9.69
100-180	177	0	184.77	22.27
160-180	207	457	211.65	22.88
180-250	267	109	271.84	30.82
250-350	372	129	385.70	40.77
350-500	529	187	637.86	61.76
500-710	752	66	794.91	71.15

Table 1 : Characteristics of sieves used for the experiments and results of the statistical study of actual grain sizes.

For the non sieved macroscopic samples, the grain size has been estimated using the Nolin and Dozier's method (Nolin and Dozier, 2000). These authors observed a strong dependence on grain size of the water ice reflectance between 0.7 and 1.3 μm, especially the 1.03 μm absorption band. They used the 1.03 μm area band to estimate the grain size of snow. Our experiments with sieved samples confirm this observation, up to 140 K : the temperature has almost no effect on the 1.05 μm and 1.3 μm band areas (figure 5, which will be described later) So, the linear dependence on grain size of the two areas of sieved icy samples have been used to estimate the mean grain size of ice and frost samples. This estimation (see table 2) had been completed at several temperatures between 80 and 140 K to calculate the standard deviation on the mean grain size. Therefore, the grain size of this study ranges between 80 and 1020 μm with standard deviations between 20 and 100 μm.

II.3. Experimental results

Twenty-four experiments have been conducted : 14 using the water frost and ice loading protocol without sieving, and 10 using the crushed ice loading procedure with sieving. With these 24 samples, for which the grain size has been precisely determined, a total of 246 experimental spectra have been acquired *in situ* with a cryostat, under well-controlled temperature and pressure (primary vacuum) conditions. Spectra have been acquired every ten degrees, by decreasing the temperature between 180 and 80 K for the no sieved "ice-type and frost-type" samples (to avoid amorphous ice condensation during the loading) and increasing the temperature from 80 K to 180 K for the others (to

avoid the sublimation of the icy sample just after the loading). This experimental data set will now be used to investigate the systematic effects of temperature and grain size on water ice near-IR spectra.

The 246 spectra have been analysed with Origin Pro© 8 Sr5 developed by OriginLab Corporation©. Each spectrum has been smoothed with an Savitzky-Golay procedure, with a degree two polynomial on 31 points of the spectrum and normalised with the Clark and Roush (1984) method. This method consists in the division of the difference of the continuum reflectance (Rc) and spectrum reflectance (R) by the continuum reflectance (Rc). The continuum reflectance is the line between the two extrema of the studied absorption band at 1.359 and 1.832 µm. Gaussian fits have been performed for each normalised 1.5 µm band using the Levenberg-Marquardt algorithm. This method is similar to the Modified Gaussian Model, of Sunshine et al. (1990). Each Gaussian (eq. 1) is described by its mean position x_c, its depth A and its Full Width Half Maximum (FWHM) which is related to the standard deviation σ (eq. 2).

$$y = Ae^{-\frac{(x-x_c)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

$$FWHM = 2\sqrt{2\ln 2}\times\sigma \approx 2.35482\sigma \quad (2)$$

Figure 3 displays a 80 µm water ice grain spectrum at 80 K. The four Gaussian functions which are required to reproduce the spectrum in the hachured spectral range between 1.4 and 1.8 µm (Clark, 1981a) are drawn in the inset graph. The large band around 1.5 µm can be recalculated with three Gaussian functions for the three absorption bands at 1.5, 1.55 and 1.65 µm and a fourth Gaussian curve is needed to fit the upper side of wings and the width of the band. The inset graph in figure 3 is an example of the fitting result (dotted grey line) of the experimental spectrum (thick solid black line) acquired on the sieved icy sample of 80 µm of particle size and at 80 K. The dashed grey curves are the Gaussian functions which sum equals the fitted curve. The residual (solid line at the bottom) is the difference between the experimental spectrum and the fitting result. The experimental spectra are fitted on 986 points and each Gaussian curve is drawn with 1000 points between 1.359 and 1.832 µm.

(Figure 3)

Gaussian functions give three criteria (the mean position x_c, the band depth A and the FWHM) that we have used to investigate the systematic relationships with grain size and temperature. Others criteria as band areas from the normalised spectra have also been calculated. Areas have been determined with a Riemann integral which represents the area between the curve and the continuum (equals to zero for a normalised spectrum). Absorption band areas are particularly sensitive to the grain size. The area of the absorption feature is directly proportional to the amount of energy absorbed by the ice particles over that spectral region (Nolin and Dozier ,2000).

The table 2 is a synthesis of acquired spectral data. For each experiment, the number of spectra, the temperature range, the grain size, the accuracies on temperature and grain size, and the type of sample are indicated. The accuracy value is the standard deviation, σ. Note that temperature range indicates the initial and final experimental temperatures and the grain size is the statistical mean value.

Experimental Reference	Number of acquired spectra	Temperature range (T)	T-measurement accuracy	Grain size (D)	D-measurement accuracy	Sample type
17032009GI	11	80-180	1	280	20	Frost
17032009GL	11	80-180	1	1020	70	Ice
09042009	11	80-180	1	690	50	Frost
10042009GI	11	80-180	1	760	90	Frost
10042009GL	11	80-180	1	770	70	Ice
14042009GI	11	80-180	1	680	40	Frost
14042009GL	11	80-180	1	190	30	Ice
15042009GL1	11	80-180	1	590	30	Ice
15042009GI1	11	80-180	1	610	60	Frost
15042009GL2	11	80-180	1	560	20	Ice
15042009GI2	11	80-180	1	540	50	Frost
16042009GI	11	80-180	1	690	100	Frost
16042009GL	11	80-180	1	270	40	Ice
24042009	6	80-180	1	480	40	Ice
09022010	8	80-150	1	270	30	Sieved Ice
17022010	10	75-200	7*	390	40	Sieved Ice
19022010	8	75-170	7*	270	30	Sieved Ice

23022010	10	75-200	7*	80	10	Sieved Ice
24022010	4	80-180	7*	640	60	Sieved Ice
26022010	20	80-200	7*	210	25	Sieved Ice
12042010	12	75-180	1	790	70	Sieved Ice
14042010	25	80-190	1	640	60	Sieved Ice

*cf. Explanation in the text (II-2 temperature)

Table 2 : Description of the experimental data set.

246 spectra have been acquired during our experiments. In the following analysis of systematic spectral relationships, only twenty percent of these data have been used to determine the dependence laws, to avoid bias which might be due to several factors : First, we noticed that the ice samples sublime a little above 140 K under vacuum, which often slightly modifies the spectra. Moreover, studies on too large temperature range would not reproduce the true characteristics of temperature dependence of the spectrum, as the sample needs more time to reach the equilibrium following a temperature change (Dalton, 2010) Therefore, all spectra obtained with a temperature higher than 140 K have not been considered. Then, in order to constrain the grain size the most precisely as possible, only sieved ice samples (for which the grain size is directly measured) have been used to establish the law. Others spectra will only be used to check laws. Nolin and Dozier, (2000) and Hansen and McCord, (2004) show that IR signature of water ice samples saturate when the grain size increases. Therefore, samples with grain size larger that 700 microns have not been considered either. Finally, a total of 47 well constrained spectra have been used to constrain the combined temperature and grain size dependence.

III. Temperature and grain-size dependence of near-IR signatures of water ice

I**II.1. Gaussian fits**.

Gaussian parameters have been investigated to determine their dependence on temperature and grain size. For the three Gaussian curves which are representatives of the broad 1.5 µm absorption band, the evolution of the centre, depth, FWHM and area have been plotted versus the temperature and the grain size (figures 4 and 5). Table 3 presents all variations of Gaussian criteria. Accuracies represent the total dispersion of the measure. This dispersion which is in the temperature dependence graphics is due to the grain size dependence and the contrary.

Band	1.5 µm band				1.55 µm band				1.65 µm band			
Criterion	80 K	140 K	80 µm	640 µm	80 K	140 K	80 µm	640 µm	80 K	140 K	80 µm	640 µm
Center	1.485	1.478	1.49	1.472	1.547	1.54	1.554	1.533	1.651	1.645	1.647	1.649
σ-Center	0.01	0.008	0.005	0.002	0.013	0.01	0.007	0.003	0.002	0.002	0.004	0.004
Depth	0.57	0.47	0.52	0.47	0.43	0.44	0.31	0.54	0.11	0.06	0.085	0.075
σ-Depth	0.08	0.02	0.06	0.03	0.13	0.1	0.03	0.02	0.03	0.001	0.025	0.025
Width	0.074	0.07	0.077	0.071	0.085	0.097	0.076	0.106	0.034	0.036	0.037	0.033
σ-Width	0.006	0.005	0.003	0.005	0.02	0.013	0.011	0.003	0.002	0.006	0.005	0.003
Area	0.045	0.036	0.042	0.035	0.041	0.045	0.026	0.056	0.0041	0.0023	0.0031	0.0026
σ-Area	0.01	0.003	0.007	0.003	0.021	0.01	0.006	0.007	0.0013	0.0008	0.0007	0.0011

Table 3 : Results of Gaussian fits. Values of each parameters and their accuracy is given for each absorption band.

All these parameters show both a temperature and grain size dependence. Figure 4 displays eight graphs corresponding to the 47 selected spectra. Four graphs correspond to the evolution of Gaussian criteria with the temperature and four others correspond to the dependence with grain size. Evolution shapes are highlighted with dashed, dashed-dotted and solid curves for each Gaussians. The positions of Gaussian centers move toward short wavelengths with increasing temperature and grain size. The evolution of each position relative to temperature (or grain size) change with grain size (or temperature). For the 1.5 µm and 1.55 µm bands variation with temperature, the slope is decreasing up to zero (trapezoid shape) with increasing grain size. A strong dependence on grain size is noticeable for grains sizes larger than 200 µm. The 1.65 µm band depends linearly on both temperature and grain size (see "Gaussian 3" shown in green triangles in figure 4). Band depths show a trapezoid shape in their dependence with temperature for the three bands, but a parabolic shape for the 1.5 and 1.65 µm band in their dependence with grain size, and a linear dependence for the 1.55 µm band which increases with grain size. 1.50 and 1.55 µm Gaussian widths displays a trapezoid shape dependence on temperature. The 1.55 µm band width depends linearly on grain size but the 1.5 µm band width shows no clear dependence on grain size. There is no clear dependence on temperature nor grain size for the

1.65 μm band width. Finally, Gaussians areas show a trapezoid shape dependence on temperature, the 1.5 and 1.65 μm band areas display a parabolic shape dependence on grain size and no clear dependence is determined for the 1.55 μm band area.

(Figure 4)

The results obtained on the bands position are different than those published by Mastrapa *et al*. (2008). However, in their study, band positions were determined by graphical reading, and the areas were calculated using the optical constants for ice instead of experimental spectra. By applying our fitting method with Origin Pro© on Mastrapa et al. (2008) spectra, we have obtained a perfect match between their data and ours. Fink and Larson (1975) completed four experiments on water frost samples condensed from water vapour and concluded that the ratio of the 1.65 μm and 1.5 μm band areas was strongly correlated with the temperature, but with different trends above or below 100 K. The same relationship has been investigated in our spectra. However, in all our experiments from 80 K to 180 K, such a change has never been observed. We argue that Fink and Larson (1975) observed the phase change from amorphous to cubic ice, because they deposited their frost at the liquid nitrogen temperature. Riemann area investigations have been completed for our spectral data on 1.05, 1.3 and on the large 1.50 μm absorption bands (figure 5). They showed a strong linear dependence on grain size, but no dependence on temperature. In order to retrieve both temperature and grain size from spectral parameters, we have therefore defined new criteria, that we define as the reduced areas of the 1.3 and 1.5 μm bands (figure 6). These reduced areas correspond to the Riemann integral of a restricted part of absorption bands (Figure 6a and 6b). They depend strongly on temperature and a only very little on grain size (figure 6c and 6d). Therefore, we performed the inversion using the Riemann areas of absorption bands to derive the grain size, and the reduced areas around the 1.3 and the 1.5 μm bands to derive the temperature. It should be noted that these criteria are divided by a reference for which the temperature and the grain size are respectively near to 140 K and 200 μm in order to be compared with others data.

III.2. The influence of the grain size

In Figure 5, the areas of the 1.05 μm, 1.3 μm, and 1.5 μm absorption bands have been plotted versus grain size and temperature respectively. The figure includes our experimental data with icy grains larger than 200 μm, and the theoretical estimates for smaller grains computed from theoretical spectra (Douté et al., 1998 ; Grundy and Schmitt, 1998). The dependence on temperature of band area has been drawn with 129 experimental data points ($200<D<700$ μm and $77<T<140$ K) and 494 theoretical data points ($10<D<200$ μm and $90<T<150$ K). The dependence on grain size has not been drawn with all experimental data for clarity. 63 experimental points have been drawn for different

grain sizes in the range between 80 and 700 µm and 77 and 140 K in temperature. These experimental points have been chosen for their good experimental constraint on grain size. For a purpose of clarity, the error bars on both temperature and grain size are not indicated, except for the few experiments with temperature standard deviation around 20 K (2σ = 14 K on the figure). For most data, it is in fact smaller or comparable to the size of the data points. In figure 5a, b and c, it can be seen that the three areas strongly increase when the grain size increases. The small vertical dispersion is due to the very weak dependence on temperature, which can also be observed in figure 5d, e and f.

(Figure 5)

It must be noticed that the dependence on grain size follows two different trends above and below 200 µm, especially for the 1.5 µm band. For grain size below 200 µm, a non linear trend needs to be taken into account while a linear relationship can be used from 200 µm up to almost 1 mm grains. The dependence of the Riemann areas is almost insensitive to temperature variations (figure 5d, e and f), at least in the range 80 – 150 K. Thus, we argue that a simple relationship between the Riemann areas and the size of the icy grains can be used, without any consideration for the temperature effect. Equation (3-4) and Table 4, established with our 41 experimental spectra (200<D<700 µm and 77<T<140 K) and 494 Douté's data (10<D<200 µm and 90<T<150 K) for small grains, describe the dependence of the Riemann areas ($A^{norm} = A^i/A^i(200\ \mu m, 140\ K)$) with respect to the grain size (D).

For grain size superior to 200 µm

$$A^{norm}(D) = a_D D + a_0 \quad (3)$$

For grain size inferior to 200 µm

$$A^{norm}(D) = a'_D \ln(D) + a'_0 \quad (4)$$

Bands	a_0	a_D	a'_0	a'_D
1.05 µm	$4.7205.10^{-1}$	$1.4171.10^{-3}$	$-6.6783.10^{-1}$	$2.8585.10^{-1}$
1.3 µm	$2.5556.10^{-1}$	$1.8753.10^{-3}$	$-6.5274.10^{-1}$	$2.8678.10^{-1}$
1.5 µm	$6.8672.10^{-1}$	$6.5132.10^{-4}$	$-2.7004.10^{-1}$	$2.3109.10^{-1}$

Table 4 : Coefficient values of the equations 3 and 4 for the three absorption band areas at 1.05, 1.30 and 1.50 µm.

III.3. The temperature effect

Clark (1981a) showed that IR spectra of ice depend on both temperature and grain size. Nonetheless, it has been shown in section III.1 that the temperature effect cannot be easily quantified from the Gaussian functions which fit the spectra. Each Gaussian criterion depends both on temperature and grain size, and the dependence law is not simple. Similarly, section III.2 showed explicitly how well the band areas depend on grain size, but also how small is the temperature effect, especially below 140 K. Nonetheless, this temperature effect exists. In figure 5, the 1.3 μm and 1.5 μm absorption bands are plotted for a given grain size (80 μm) and for temperature ranging from 80 K to 140 K (Experiment 23022010, see Table 2). On the left, two inflection points (encircled in figures 6a and 6b) are identified on the normalised absorption bands. No inflection points have been identified for the normalised 1.05 μm absorption band. These two points are insensitive to temperature. The temperature effect is in fact opposite on both side of the second inflection point, which certainly explains why the Riemann areas do not display the temperature effect of the IR spectra. This interesting property has been used to draw a new baseline with the two inflection points, which allows the calculation of a "reduced" area (hachured domain). On the right (figures 6c and 6d), the dependence with temperature of the 1.3 and 1.5 μm reduced band areas for different grain sizes is illustrated. Similarly to the whole area, the dependence on the gain size is strong. On the other hand, the temperature effect is also clearly visible, and in this case, the grain size does not affect the slope of the linear temperature dependence, at least from 80 μm to 1020 μm. Thus, a linear dependence of the reduced area versus temperature can be identified.

(Figure 6)

Using our 47 data points (200<D<700 μm and 77<T140 K), the dependence of the normalised reduced areas ($A_{Norm}^{Reduced} = A^{Reduced} / A^{Reduced}(200\mu m,140K)$) for the 1.3 μm and 1.5 μm bands has been assessed using the following law:

$$A^{reduced} = b_0 + b_T T + b_D D \quad (5)$$

and parameters as defined in table 5.

	Normalised reduced area of the 1.3 μm band	Normalised reduced area of the 1.5 μm band
b_0	1.9909	2.2624
b_T	$-1.0427.10^{-2}$	$-8.8480.10^{-3}$
b_D	$2.1958.10^{-3}$	$8.7227.10^{-5}$

Table 5 : Coefficients values obtained by the resolution of the inverse problem for the normalised reduced area of the 1.30 and 1.50 μm bands criteria.

Section III.2 shows how the grain size can be constrained, and this section III.3 shows how the temperature is calculated from IR icy signature. If the grain size can be estimated from spectral data without any *a priori* knowledge of the temperature, we find that to derive the temperature, it is first needed to estimate the grain size (with areas laws), before obtaining the temperature with reduced areas laws.

III.4. The inverse problem

In order to check the validity of the scaling laws described above and determine whether or not such laws can be used for planetological applications, in particular for the VIMS/Cassini spectral images, an inverse problem has been set up using the 47 experimental data of this work. The first estimation of the grain size uses the equations 3 and 4 with parameters describing the 1.5μm band. The spectral resolution of the VIMS mapping spectrometer onboard Cassini is smaller than the lab spectrometer. We therefore used in a first step the,1.5 μm band area (which is the broader, and consequently the one which is the most easily resolved) to estimate grain size. The procedure is split in two steps. First, the Riemann area of the 1.5 μm band is computed for each spectra. Using equations (3-4), the grain size can be estimated. Second, the reduced areas of both the 1.3 μm and 1.5 μm bands are determined using the inflexion points described in the previous section. Equation (5) is then used to compute the temperature. In Figure 7, theoretical temperature and grain size computed with this approach are compared to the actual values measured in our experiments. We see that the fit is very good, with a regression coefficient near to 1. The grain size estimates using the Riemann areas provides an almost perfect match from few μm up to 800 μm. The standard deviation is 20 μm, as shown by the hachured area in figure 7 which plots the 2σ domain. As expected from the previous discussion, the retrieval of the temperature from the IR spectra is much more challenging than the grain size. However, the derived temperature range is accurate, with a standard deviation close to 10 K, as shown by the 2σ domain in figure 7.

(Figure 7)

IV. Planetological applications – the South pole of Enceladus

Fink and Larson (1975) and Leto *et al*. (2005) showed that the infrared spectrum of water ice can be used as a probe to determine the surface temperature of a planet. Leto *et al*. (2005) used the method initially proposed by Fink and Larson (1975), which relies on the dependence of area ratios versus temperature on two laboratory water ice spectra and conclude on the possibilities to determine the temperature of a planet surface using spectral features of the water ice spectrum. Nevertheless no temperature map distribution had already been drawn using this technique.

Near infrared spectroscopy revealed that Enceladus' surface is almost completely dominated by pure water ice, which is mainly in a crystalline state (Cruikshanks 1980 ; Grundy et al., 1999 ; Cruikshank et al., 2005 ; Emery et al., 2005 ; Verbiscer et al., 2006 ; Brown et al., 2006 ; Jaumann et al., 2008 ; Newman et al. 2008). At the sale time, Enceladus south pole displays significant variations of temperature (Spencer et al., 2006 ; Abramov and Spencer, 2009). As water ice IR signature is sensitive to the abundance of ice and contamination by other materials (Clark, 1981b, Clark and Lucey 1984, Grundy et al., 1999), Enceladus' south pole is therefore one of the most ideal cases to apply the laws derived in the previous section because few contaminants have been observed, such as CO_2 detected thanks to a very shallow band at 4.26 μm (Brown et al., 2006). However, no other absorption band diagnostic of CO_2 ice can be seen in the spectra at shorter wavelengths. It therefore does not preclude the use of our laws derived on pure water ice.

The Visual Infrared Mapping Spectrometer (VIMS) onboard Cassini takes hyperspectral 64x64 images with a 352-channels spectrum for each pixel (Brown et al. 2004). The wavelength ranges from 0.35 μm to 5.2 μm, with a spectral resolution of 16 nm in the near-infrared domain. The VIMS observations of Enceladus analysed in this study were acquired during the Cassini flyby S12/EN111 on July the 14th 2005. It corresponds to the cube labelled CM_1500061286_1 which has been acquired with a time exposure of 160 ms, a spatial resolution of ~5 km/pixel. This observation almost covers the south pole of Enceladus. VIMS pixels have been geometrically reprojected on an Enceladus ISS image used as background (Porco et al., 2006, Roatsch et al. 2008). After reprojecting the VIMS data automatically using the SPICE kernels, we had to apply a supplementary shift of one pixel in diagonal in order to match VIMS and ISS images. This corresponds to the typical uncertainty expected in the navigation ancillary files. Geological features influence the spectral images which permit to check the matching between the two images. The VIMS image shows the Tiger Stripes region (figure 8a). In this image, pixels on the night side (incidence > 90°) have not been plotted. Pixels with saturated I/F values have also been masked.

The Tiger stripes active region is composed of four faults roughly 130 km long, 2 km wide (less than VIMS Spatial resolution) and 500 m in depth (Helfenstein et al., 2010). Edges are thought to

be 100 m high and 2 to 4 km wide (Porco et al., 2006). Gioia et al. (2007) postulate that Tiger Stripes penetrate a 35 km thick lithosphere equivalent to the mean spacing between them.

For this study, VIMS spectra have been normalised with respect to the pixel indicated in the inset in figure 8a, and which spectrum is given in the inset in figure 8e. All criteria (1.5 µm band area and 1.30 and 1.50 µm band reduced areas) have been divided by their corresponding value at the reference pixel. The grain size is then estimated with equation 4. Using parameters X0, aT and aD from table 3 of the 1.5 µm band, a least-squares inversion on the reduced areas around 1.3 and 1.5 µm has been computed to estimate the temperature and the grain size at Enceladus' surface.

The grain size map (figure 8b) is consistent with the distribution derived by Jaumann et al. (2008). The ice grain size is close to 200-250 µm on the Tiger Stripes and decreases down to 70-100 µm away from the stripes (both between the stripes and away from the zone).

(Figure 8)

The temperature distribution map is shown in figure 8d. As already stated in the experimental section, the estimation of the temperature using equations 4 and 5 is only valid for crystalline water ice. Newman *et al*. (2008) show that between the Tiger Stripes, the water ice is amorphous. We can indeed observe that the depth of the 1.65 µm band is less deep between the Tiger Stripes than in spectra extracted around. The spectral signature of the amorphous state is similar to a spectral signature of a warmer ice. A spectral parameter has been therefore computed to derive the degree of crystallinity of the ice using the Fresnel peak at 3.1 µm (figure 8c). The 3.1 µm height peak (H_p) is defined by the equation (6). Pixels which do not present the Fresnel peak correspond to amorphous ice and are therefore not drawn on the final temperature map (figure 8d).

$$H_p = \left| R_f - \left(\frac{R_2 - R_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (\lambda_f - \lambda_1) + R_1 \right) \right| \qquad (6)$$

Where Hp is the fresnel height peak, R_f is the fresnel reflectance value at the fresnel wavelength λ_f = 3.0969 µm, R_1 is the reflectance value at the wavelength λ_1 = 3.0138 µm and R_2 is the reflectance value at the wavelength λ_2 = 3.1797 µm.

Figure 8d shows a temperature of ~130 K on the Tiger Stripes. This is in good agreement with the temperatures which were derived independently by the CIRS (Composite InfraRed Spectrometer) instrument onboard Cassini using thermal emission (Spencer et al. 2006). However, as VIMS produces 2D spectral images, the temperature field can now be derived on the whole area, whereas the point spectrometer CIRS provides only transects.

The surface of Enceladus outside the Tiger Stripes is probably amorphous (Brown *et al.*, 2006), due to the space weathering processes. Water ice deposited on Enceladus' surface could be also amorphized by high energy ions or electrons from Saturn's magnetosphere (Newman *et al.*, 2008). Therefore, our method to derive the surface temperature using infrared spectra could not be applied to the whole surface. However, the technique could be applied locally provided that we have spatially resolved images of fresh impact craters, which would possibly excavate fresh crystalline ice. It would therefore be very interesting to acquire new VIMS data at high spatial resolution in order to identify fresh impacts and therefore to be able to constrain locally both the grain size and temperature. Alternatively, new experiments focused on amorphous water ice properties could be useful to adapt or extent the applicability of the laws that we derived here.

Conclusion

We have set up a complete experimental facility to acquire infrared spectra of well constrained water ice grain samples at temperatures varying in the range 80-180K. The cryostat has been developed in building a new cover and installing the sapphire window above the parabolic mirror. This improvement permits to acquire very good quality spectra. A cool chamber acquisition has allowed the use of sieves and thus, to obtain samples very well constrained in terms of grain size.

Spectra have been systematically studied with Gaussians functions, but if Gaussians parameters appear dependent on temperature and grain size, we found no simple systematic relationship which would link these parameters to the actual temperature and grain size of the samples. Moreover, Gaussian functions physically represent charge transfers which imply absorption bands in the mineral case. Samples, studied here, are water ice grain and their absorption bands are due to rotation and vibration of the molecules. Gaussian function are may be not good representations of their IR signatures. We have therefore investigated normalized absorption bands areas instead. Our experimental dataset shows that the 1.05, 1.3 and 1.5 μm absorption bands normalized areas are independent on temperature for temperatures inferior to 140 K, and can therefore be used to constrain the grain size. Two laws have been derived with these criteria. A linear law accounts for grains superior to 200 μm and a logarithmic law explains the behavior of grains inferior to 200 μm.

Once the grain size is obtained, we have defined new criteria corresponding to reduced band areas around the 1.3 and 1.5 μm absorption bands, which depend mainly on temperature and very little on grain size. They can therefore provide an estimate the temperature of water ice spectra with an accuracy of 10K.

The surface of Enceladus is made of almost pure water ice, and displays significant temperature variations on the south pole. The crystallinity of the ice on Enceladus is sufficient around the Tiger Stripes to apply the temperature and grain size derivation method that we have developed, using spectra acquired by the VIMS imaging spectrometer onboard Cassini spacecraft. The grain size distribution map appears consistent with the study by Jaumann et al. (2008) and is little (or no) dependent on the crystallinity. The temperature distribution map that we derived from the VIMS spectra is consistent with measurements made by Spencer et al. (2006) using CIRS thermal infrared data. We found temperature values of 130K on the Tiger stripes. So far, our method can not be applied on amorphous ice, for which more experimental work is needed. VIMS images acquired at higher spatial resolution on the Tiger Stripes would be very interesting in order to better constrain the temperature field at the south pole of Enceladus.

Acknowledgements

This work has been supported by the programme National de Planétologie and the Centre National d'Etudes Spatiales. A special thanks goes to Dr. Sylvain Douté, who kindly provided to us all the theoretical spectra from the Laboratoire de Planetologie de Grenoble at the microscopic scale, and for insightful comments. We also thank Dr. Jean-Philippe Combe for his help with MGM.

References

Abramov, O., Spencer, J. R., 2009. Endogenic heat from Enceladus' south polar fractures : New observations, and models of conductive surface heating. Icarus, 1991, 189–196

Bertie, J. E.,Whalley, E., 1967. Optical Spectra of Orientationally Disordered Crystals. II. Infrared Spectrum of Ice Ih and Ice Ic from 360 to 50 cm^{-1}. J. Chem. Phys., 46, 1271

Brown, R.H., Baines, K.H., Bellucci, G., Bibring, J.P., Burratti, B.J., Bussoletti, E., Capaccioni, F., Cerroni, P., Clark, R.N., Coradini, A., Cruikshank, D.P., Drossart, P., Formisano, V., Jaumann, R., Langevin, Y., Matson, D.L., McCord, T.B., Miller, E., Nelson, R.M., Nicholson, P.D., Sicardy, B., Sotin, C., 2004. The Cassini Visual and Infrared Mapping Spectrometer investigation. SSR. 115, 111–168

Brown, R., Clark, R., Buratti, B., Cruikshank, D., Barnes, J., Mastrapa, R., Bauer, J., Newman, S., Momary, T., Baines, K., Bellucci, G., Capaccioni, F., Cerroni, P., Combes, M., Coradini, A., Drossart, P., Formisano, V., Jaumann, R., Langevin, Y., Matson, D., McCord, T., Nelson, R., Nicholson, P., Sicardy, B., Sotin C., 2006. Composition and physical properties of Enceladus' surface. Science 311, 1425–1428

Carlson, R. W., Weissman, P. R., Smythe, W. D., Mahoney, J. C., 1992. Near-Infrared Mapping Spectrometer experiment on Galileo. SSR, 60, 457-502

Clark, R. N., 1980. Ganymede, Europa, Callisto, and Saturn's rings: Compositional analysis from reflectance spectroscopy. Icarus , 44, 388-409

Clark, R. N., 1981a. Water frost and ice : the near-infrared spectral reflectance 0.65-2.5 μm. JGR, 86, 3087-3096

Clark, R. N, 1981b. The spectral reflectance of water-mineral mixtures at low temperatures. JGR, 86, 3074-3086

Clark, R. N., Fanale, F. P., Zent, A. P., 1983. Frost grain size metamorphism: Implications for remote sensing of planetary surfaces. Icarus, 56, 233-245

Clark, R. N., Lucey, P., 1984. Spectral Properties of Ice-Particulate Mixtures and Implications for Remote Sensing 1. Intimate Mixtures. JGR, 89, 6341-6348

Clark, R. N., Roush, T., 1984. Reflectance Spectroscopy : Quantitative Analysis Techniques for Remote Sensing Applications. JGR, 89, 6329-6340

Cruikshank, D. P., 1980. Near-infrared studies of the satellites of Saturn and Uranus. Icarus, 41, 246-258

Cruikshank, D. P., Owen, T. C., Ore, C. D., Geballe, T. R., Roush, T. L., de Bergh, C., Sandford, S. A., Poulet, F., Benedix, G. K., Emery, J. P., 2005. A spectroscopic study of the surfaces of Saturn's large satellites: H_2O ice, tholins, and minor constituents. Icarus, 175, 268-283

Cruikshank, D.P., Brown, R.H., Calvin, W.M., Roush, T.L., Bartholomew, M.J., 1998. Ices on the satellites of Jupiter, Saturn and Uranus, in: Schmitt, B., De Bergh, C., Festou, M. (Eds), Solar System Ices. Kluwer Academic Publishers. 579-606

Dalton, J. B., 2010. Spectroscopy of Icy Moon Surface Materials. SSR, 153, 1-29

Doute, S., Schmitt, B., 1998. A multilayer bidirectional reflectance model for the analysis of planetary surface hyperspectral images at visible and near-infrared wavelengths. JGR, 103, 31367-31390

Emery, J. P., Burr, D. M., Cruikshank, D. P., Brown, R. H., Dalton, J. B., 2005. Near-infrared (0.8 - 4.0 μm) spectroscopy of Mimas, Enceladus, Tethys, and Rhea. A&A, 435, 353-362

Fink, U., Larson, H. P., 1975. Temperature dependence of the water ice spectrum between 1 and 4 microns : Application to europa, ganymede and saturn's rings. Icarus, 24, 411–420

Gioia, G., Chakraborty, P., Marshak, S., Kieffer, S.W., 2007. Unified model of tectonics and heat transport in a frigid Enceladus. Proc. Natl Acad. Sci. 104, 13578-13581

Grundy, W. M., Buie, M. W., Stansberry, J. A., Spencer, J. R., Schmitt, B., 1999. Near infrared spectra of icy outer solar system surfaces : Remote determination of H_2O ice temperatures. Icarus,142, 536–549

Grundy, W. M., Schmitt, B., 1998. The temperature dependent near infrared absorption spectrum of hexagonal H_2O ice. JGR, 103, 25809–25822

Hagen, W., Tielens, A. G., 1983. The librational region in the spectrum of amorphous solid water and ice Ic between 10 and 140 K. Spectrochim. Acta A: Mol. Biomol. Spectrosc., 38, 1089-1094

Hansen, G.B., McCord, T.B., 2004. Amorphous and crystalline ice on the Galilean satellites : A balance between thermal and radiolytic process. JGR, 109, E01012

Helfenstein, P., 2010. Planetary science: Tectonic overturn on Enceladus. Nature Geosci, 3, 75-76

Jaumann, R., Stephan, K., Hansen, G., Clark, R., Buratti, B., Brown, R., Baines, K., Newman, S., Bellucci, G., Filacchione, G., Coradini, A., Cruikshank, D., Griffith, C., Hibbitts, C., McCord, T., Nelson, R., Nicholson, P., Sotin, C., Wagner R., 2008. Distribution of icy particles across Enceladus' surface as derived from cassini vims measurements. Icarus, 193, 407–419

Klima, R.J., Carlé P.M., 2006. Nearand midinfrared microspectroscopy of the ronda peridotite. JGR, 111, noE1

Kuiper, G. P., 1957. Infrared observations of planets and satellites. Astron. J., 62, 295-295

Leto, G., Gomis, O., Strazzulla G., 2005. The reflectance spectrum of water ice : Is the 1.65 μm peak a good temperature probe ? Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplement 6, 57

Mastrapa, R., Brown, R., 2006. Ion irradiation of crystalline H_2O ice: Effect on the 1.65 μm band. Icarus, 183, 207-214

Mastrapa, R., Bernstein, M., Sandford, S., Roush, T., Cruikshank, D., Ore, C. D., 2008. Optical constants of amorphous and crystalline H_2O ice in the near infrared from 1.1 to 2.6 μm. Icarus, 197, 307–320

Mastrapa, R. M., Sandford, S., Roush, T., Cruikshank, D., Ore, C. D., 2009. Optical Constants of Amorphous and Crystalline H2O-ice: 2.5-22 μm (4000-455 cm^{-1}) Optical Constants of H_2O-ice. The Astrophys. J., 701, 1347.

Newman, S. F., Buratti, B., Brown, R., Jaumann, R., Bauer, J., Momary, T., 2008. Photometric and spectral analysis of the distribution of crystalline and amorphous ices on Enceladus as seen by Cassini. Icarus, 193, 397-406

Nolin, A.W., Dozier, J., 1993. Estimating snow grain size using AVIRIS data. Rem. Sens. of Env., 44, 231-238

Nolin, A. W., Dozier, J., 2000. A hyperspectral method for remotely sensing the grain size of snow. Rem. Sens. of Env., 74, 207–216

Painter, T. H., Roberts, D. A., Green, R. O., Dozier, J., 1998. The Effect of Grain Size on Spectral mixture Analysis of Snow-Covered Area from AVIRIS Data. Rem. Sens. of Env., 65, 320-332

Porco, C. C., Helfenstein, P., Thomas, P. C., Ingersoll, A. P., Wisdom, J., West, R., Neukum, G., Denk, T., Wagner, R., Roatsch, T., Kieffer, S., Turtle, E., McEwen, A., Johnson, T. V., Rathbun, J., Veverka, J., Wilson, D., Perry, J., Spitale, J., Brahic, A., Burns, J. A., DelGenio, A. D., Dones, L., Murray, C. D., Squyres, S., 2006. Cassini Observes the Active South Pole of Enceladus. Science, 311, 1393-1401

Roatsch, Th., Wählisch, M., Giese, B., Hoffmeister, A., Matz, K.D., Scholten, F., Kuhn, A., Wagner, R., Neukum, G., Helfenstein, P., Porco, C., 2008. High-resolution Enceladus atlas derived from Cassini-ISS images. PSS, 56, 109–116

Schmitt, B., Quirico, E., Trotta, F., Grundy, W., 1998. Optical properties of ices from UV to infrared in: Schmitt, B., De Bergh, C., Festou, M. (Eds), Solar System Ices. Kluwer Academic Publishers. 199-240

Smith, R., Robinson, G., Hyland, A., Carpenter, G., 1994. Molecular ices as temperature indicators for interstellar dust: the 44- and 62-μm lattice features of H_2O ice. M. Not. of the Roy. Astrono. Soc., 271, 481-489

Spencer, J. R., Pearl, J. C., Segura, M., Flasar, F. M., Mamoutkine, A., Romani, P., Buratti, B. J., Hendrix, A. R., Spilker, L. J., Lopes, R. M. C., 2006. Cassini encounters Enceladus : background and the discovery of a south polar hot spot. Science, 311, 1401-1405

Sunshine, J., Pieters, C.M., Prat, S.F., 1990. Deconvolution of mineral absorption bands: an improved approach. JGR, 93, 6955–6966

Verbiscer, A. J., Peterson, D. E., Skrutskie, M. F., Cushing, M., Helfenstein, P., Nelson, M. J., Smith, J., Wilson, J. C., 2006. Near-infrared spectra of the leading and trailing hemispheres of Enceladus. Icarus, 182, 211-223

Warren, S.G., 1984. Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave, Appl. Opt., 23, 1206-1225

Wiscombe, W.J., Warren, S.G., 1980. A model for the spectral albedo of snow, I. Pure snow, J. Atmos. Sci., 37, 2712-2733

Figure captions

FIGURE 1 : Theoretical spectrum of 100 µm water ice grain from Cruishank (1998) calculated with optical constants of Warren (1984). We focus in our study on the hatched area. Specific studied bands are pointed on the spectrum.

FIGURE 2 : a) Photography taken by an optical microscope of typical icy grains. Straight lines represent the local measurements. b) Example of result of the statistical study of the grain size distribution. The histogram is the count of measures relative to the grain size. The vertical dashed dotted line is the sieve's limits, the vertical dashed line is the mean of the measured grain size, the horizontal dotted line is the standard deviation of the measurement and the black solid curve is the normal distribution of the grain size, representative of the grain size in the sample.

FIGURE 3 : Spectrum of sieved water ice sample at 80 K The mean grain size is 80 µm. The broad normalized 1,5 µm absorption band can be fitted using four Gaussian curves (shown in the inset). The experimental spectrum is the thick solid curve, the model is the dotted line, Gaussians are the dashed lines, and the residual curve is the solid line at the bottom.

FIGURE 4 : Variation of Gaussian parameters with grain size and temperature on our experimental spectra. Criteria (center position, amplitude, FWHM, Gaussian area) of the three Gaussian functions representative of physical absorption bands are drawn relative to the temperature (left) and the grain size (right). Each Gaussian result is represented by a symbol. Evolution shapes are highlighted by dashed, dash-dotted and solid lines for each criteria of each Gaussian curve.

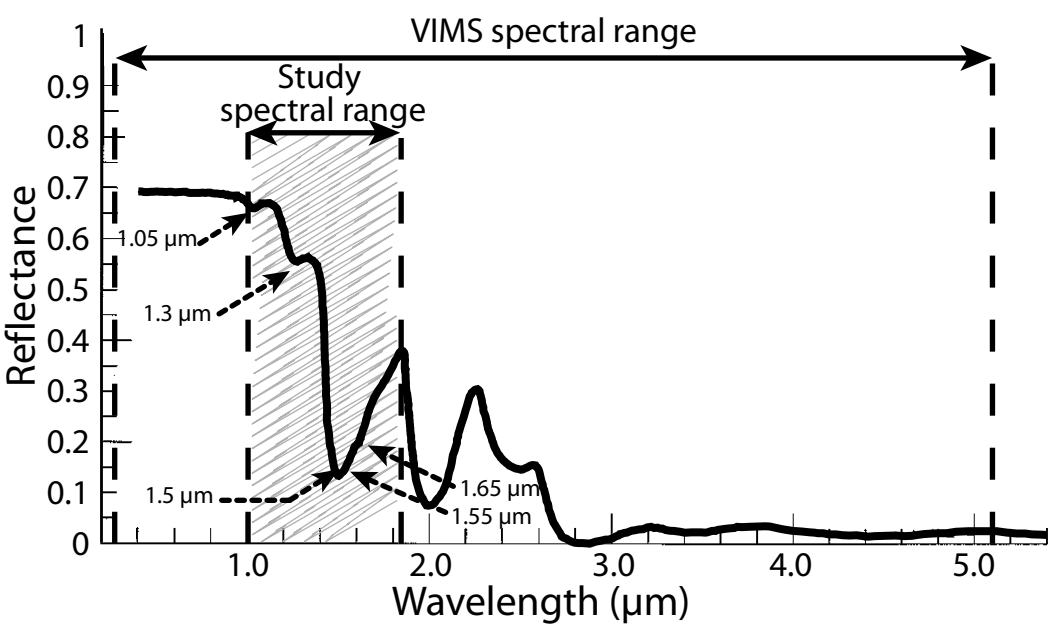
FIGURE 5 : a) Riemann area of the 1,05 µm band versus grain size. b) Riemann area of the 1,30 µm band versus grain size. c) Riemann area of the 1,50 µm band versus grain size. d) Riemann area of the 1,05 µm band versus temperature. e) Riemann area of the 1,30 µm band versus temperature. f) Riemann area of the 1,50 µm band versus temperature.

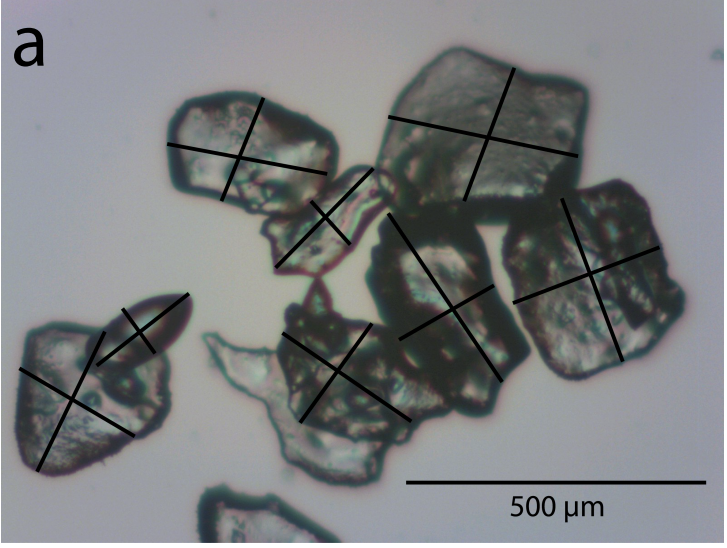
FIGURE 6 : a) Definition of the reduced area (hachured zone) of the 1,30 µm band. b) Definition of the reduced area (hachured zone) of the 1,50 µm band. c) Reduced area of the 1,30 µm band plotted versus temperature. d) Reduced area of the 1,50 µm band plotted versus temperature. Each grain size has a different symbol.

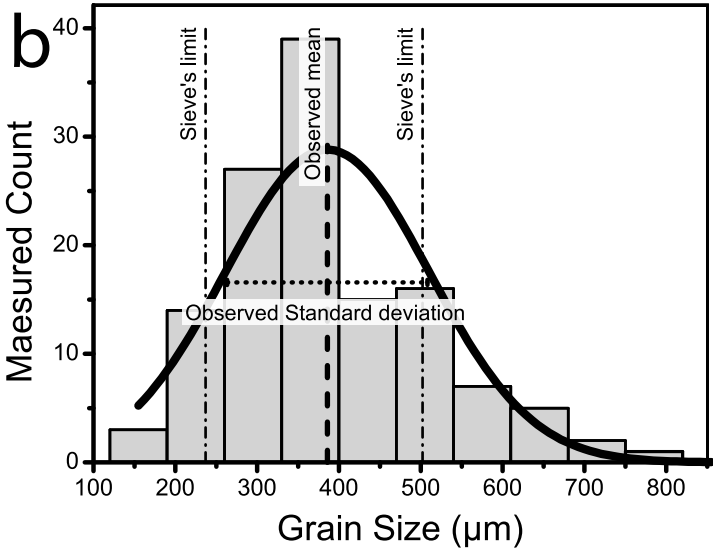
FIGURE 7 : a) Comparison between predicted temperatures and actual values. The dashed line is the straight y=x. The two dashed dotted lines are the limits of the 2σ variation. The standard deviation on temperature σ is 10 K. Horizontal error bars represent the 2σ error on measured temperature. When there is no error bar, the error is contained within the size of the square point. b) Comparison between predicted grain size and measured values.. The dashed line is the straight y=x. The two dashed dotted lines are the limits of the 2σ. σ is the standard

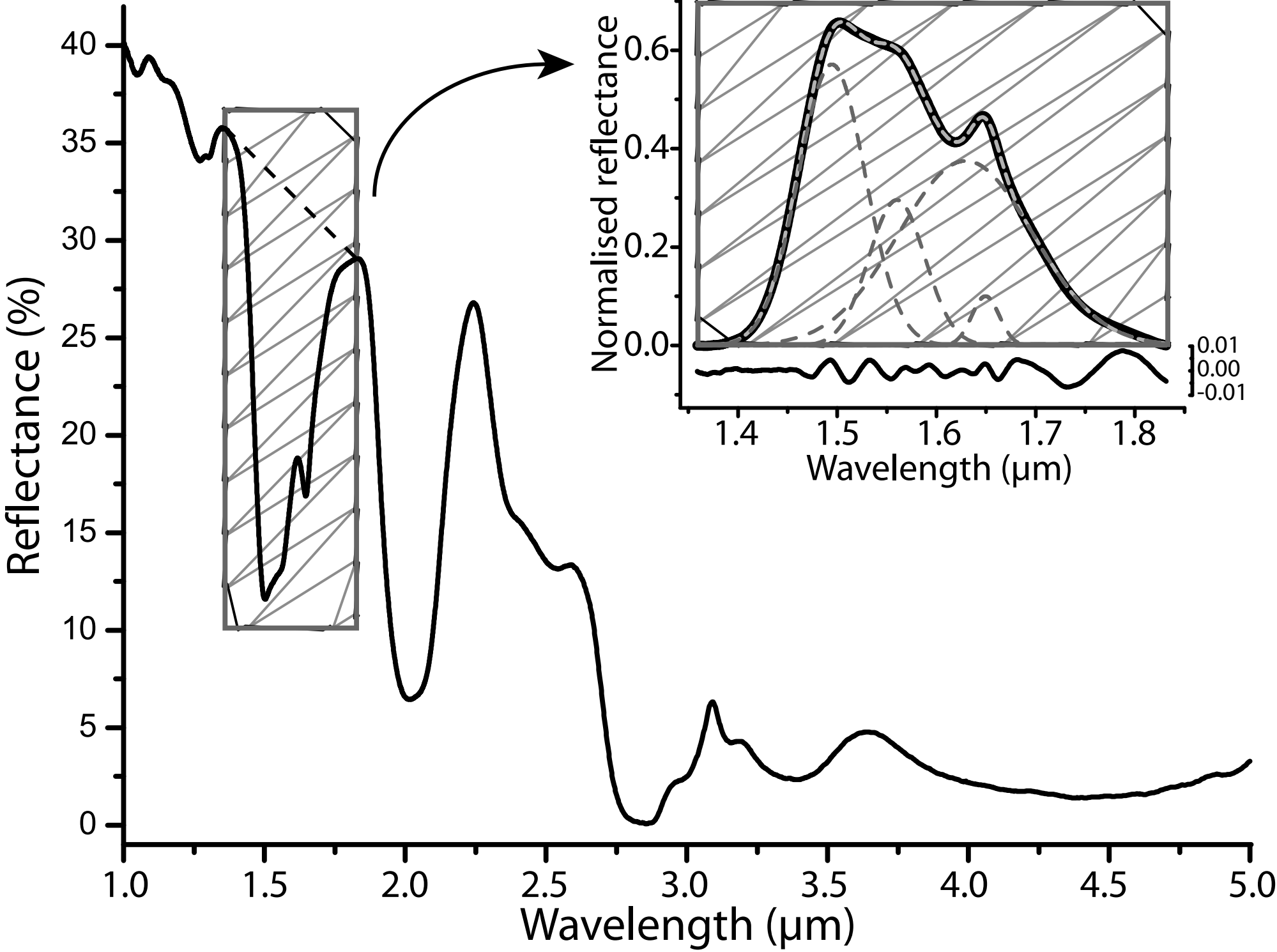
deviation equals to 25 μm for the grain size. Horizontal error bars represent the 2σ error on measured grain size.

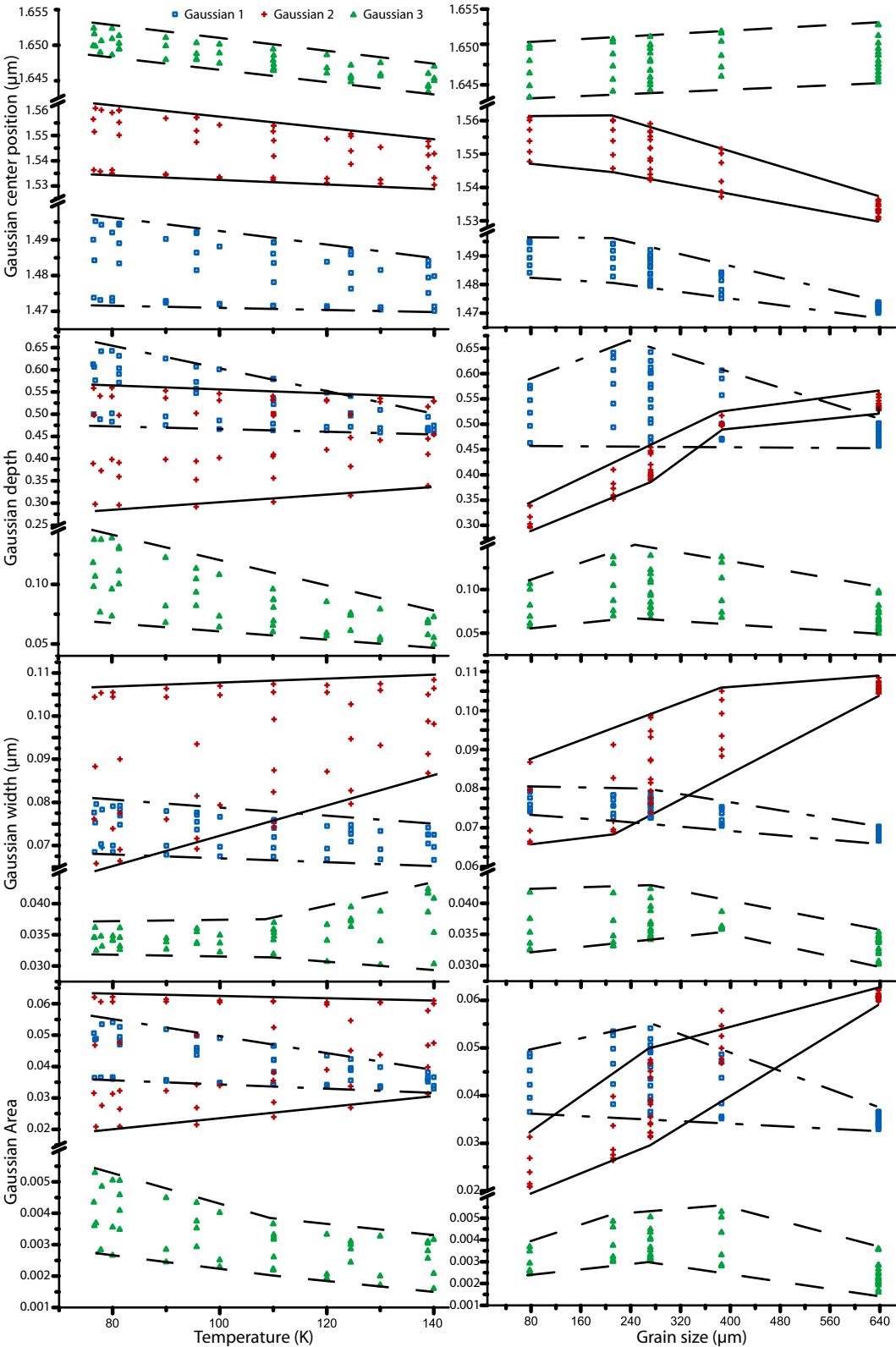
FIGURE 8 : a) False color composite (Red=1.5 μm, Green=1.3 μm, blue = 1.03 μm) of VIMS cube CM_1500061286_1 acquired on 14 July 2005, reprojected on an ISS background seen by transparency. The "Tiger Stripes" appear in bluish tones on the south pole of Enceladus. b) Distribution of the grain size obtained with VIMS spectra using the laws derived in our study. The grain size is larger (200 – 250 μm) on the Tiger Stripes than in the surroundings (70-100 μm). This result is consistent with Jaumann *et al*. (2008). c) 3.1 μm peak height map. The fresnel peak is the cristallinity criterion used to filter amorphous ice pixels. d) Distribution of the temperature obtained with the VIMS cube (CM_1500061286_1). We find a temperature on the Tiger Stripes of about 130 K, which is consistent with the values of Spencer *et al.* (2006) derived independently from the CIRS thermal emission experiment (values indicated in black figures).

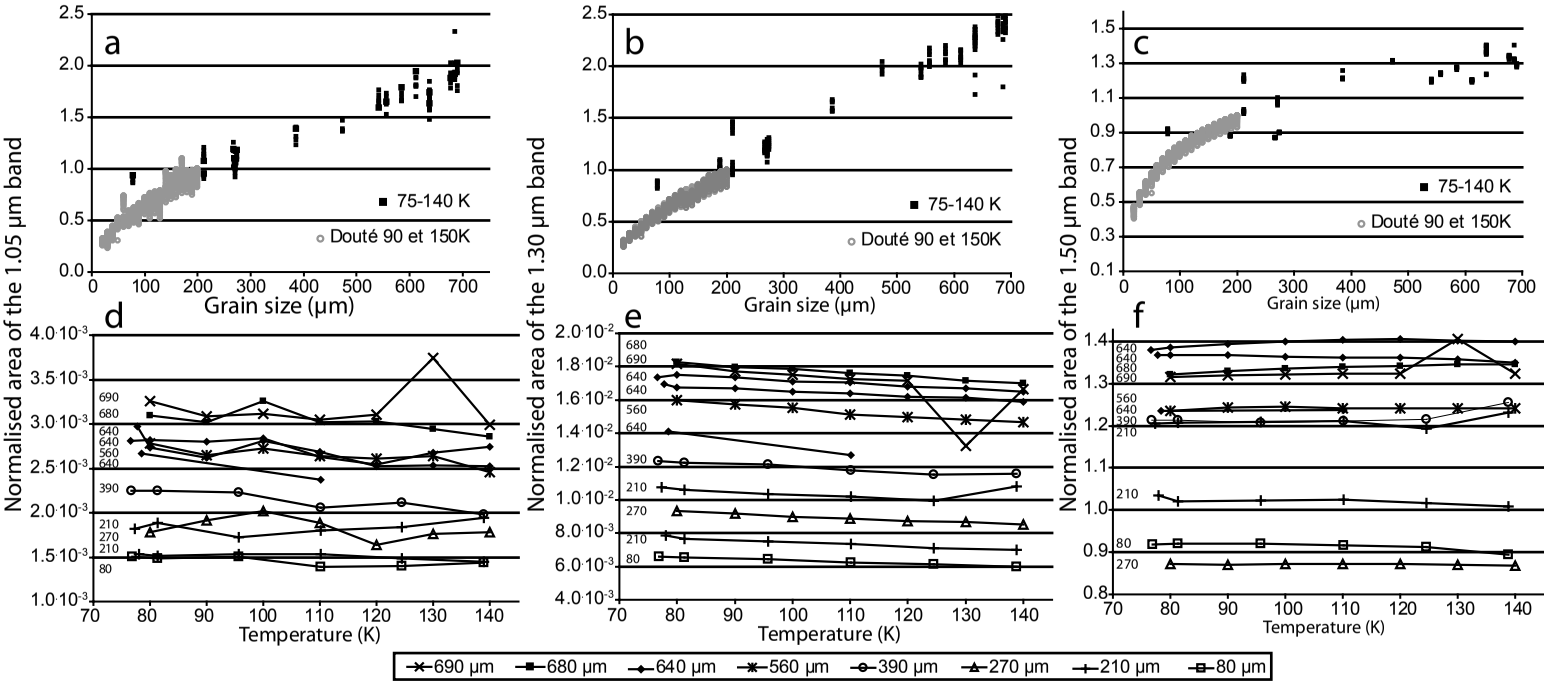

VIMS spectral range
Study
spectral range
Reflectance
Wavelength (μm)
1.05 μm
1.3 μm
1.5 μm
1.65 μm
1.55 μm
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1
1.0
2.0
3.0
4.0
5.0

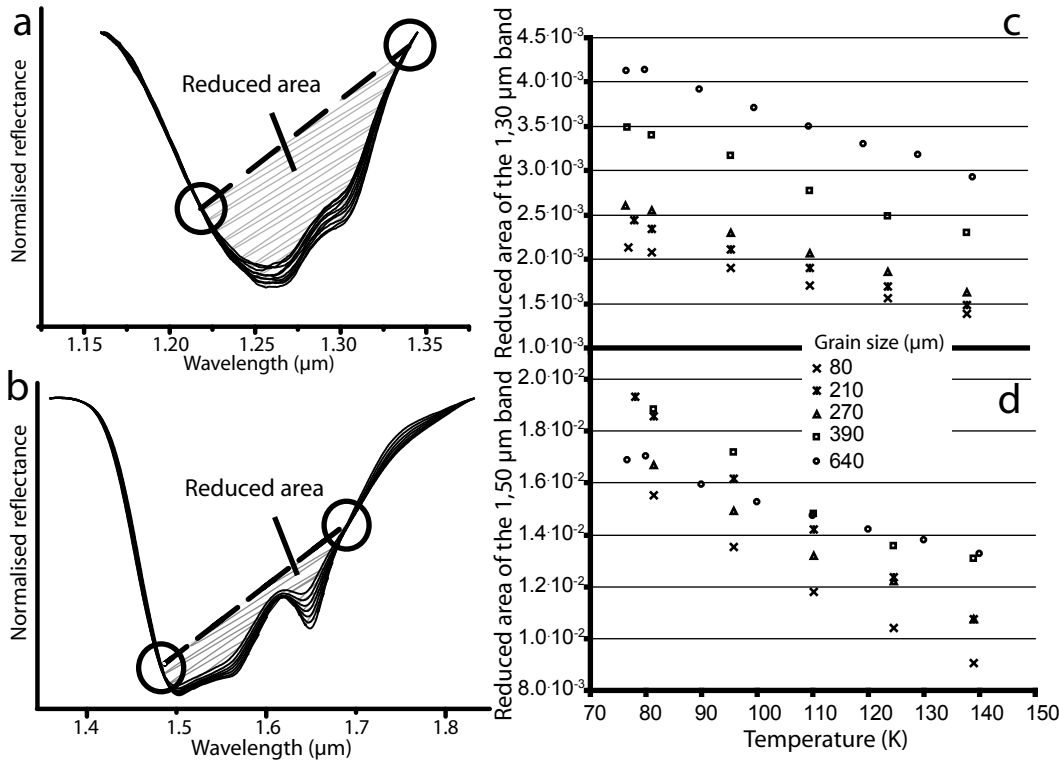

a
500 µm

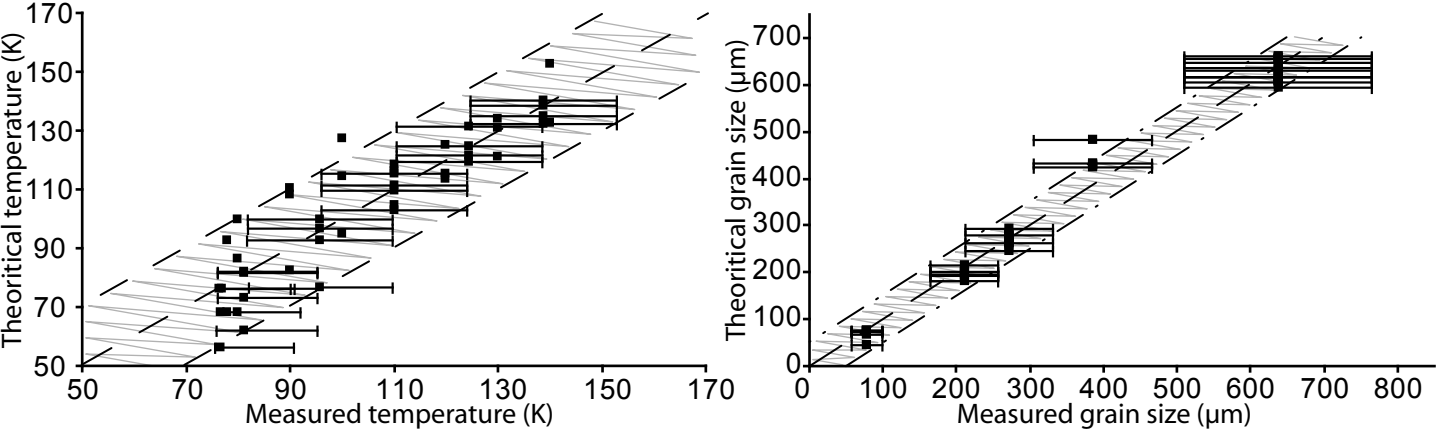

b
Maesured Count
Grain Size (µm)
Sieve's limit
Observed mean
Sieve's limit
Observed Standard deviation
0
10
20
30
40
100
200
300
400
500
600
700
800

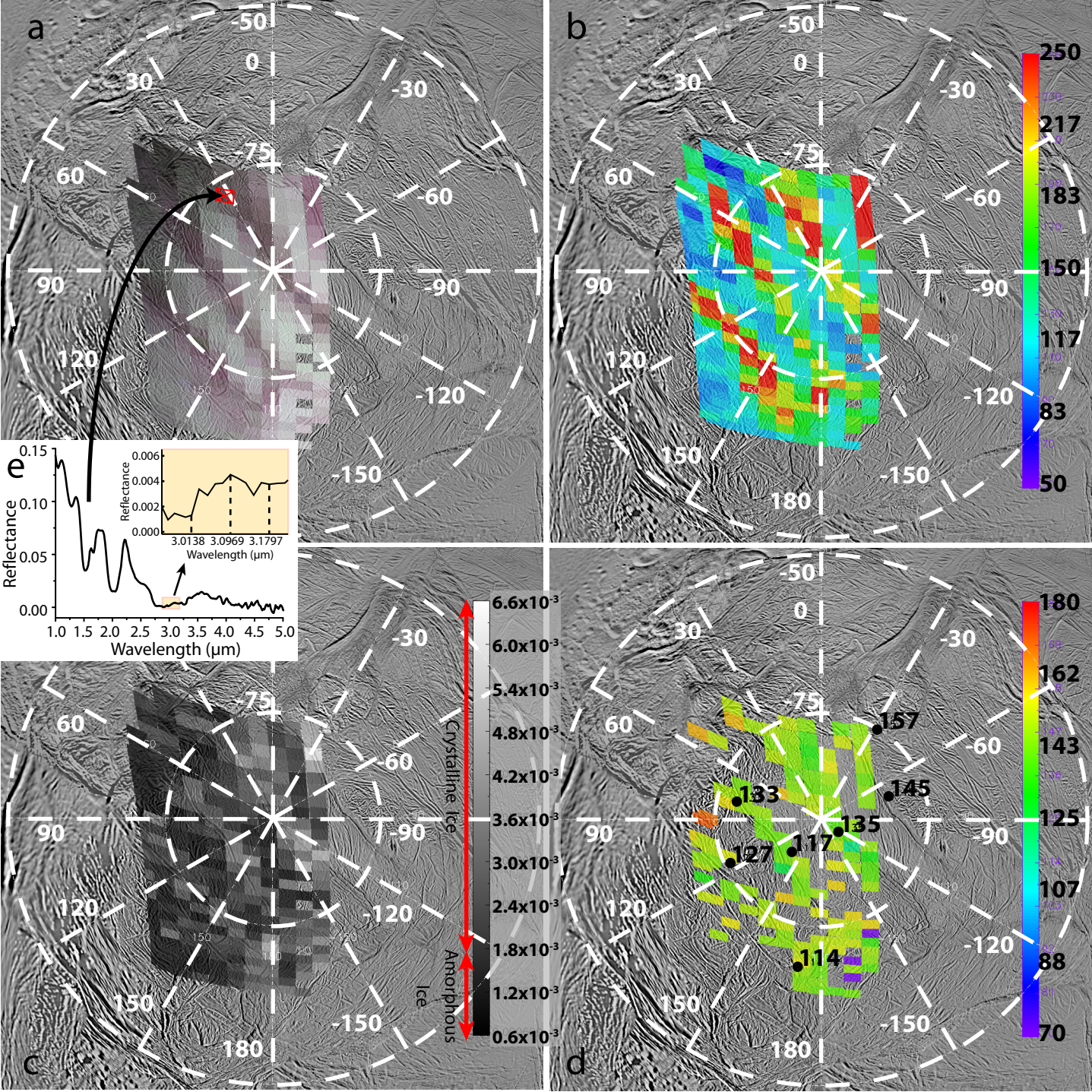

Reflectance (%)
40
35
30
25
20
15
10
5
0
1.0
1.5
2.0
2.5
3.0
3.5
4.0
4.5
5.0
Wavelength (μm)
Normalised reflectance
0.6
0.4
0.2
0.0
0.01
0.00
-0.01
1.4
1.5
1.6
1.7
1.8
Wavelength (μm)


Gaussian 1
Gaussian 2
Gaussian 3
Gaussian center position (μm)
Gaussian depth
Gaussian width (μm)
Gaussian Area
Temperature (K)
Grain size (μm)


a
b
c
d
e
f
Normalised area of the 1.05 µm band
Normalised area of the 1.30 µm band
Normalised area of the 1.50 µm band
Grain size (µm)
Temperature (K)
75-140 K
Douté 90 et 150K
690 µm
680 µm
640 µm
560 µm
390 µm
270 µm
210 µm
80 µm


a
Normalised reflectance
Reduced area
1.15
1.20
1.25
1.30
1.35
Wavelength (µm)
b
Normalised reflectance
Reduced area
1.4
1.5
1.6
1.7
1.8
Wavelength (µm)
c
Reduced area of the 1,30 µm band
4.5·10-3
4.0·10-3
3.5·10-3
3.0·10-3
2.5·10-3
2.0·10-3
1.5·10-3
1.0·10-3
Grain size (µm)
80
210
270
390
640
d
Reduced area of the 1,50 µm band
2.0·10-2
1.8·10-2
1.6·10-2
1.4·10-2
1.2·10-2
1.0·10-2
8.0·10-3
70
80
90
100
110
120
130
140
150
Temperature (K)


Theoritical temperature (K)
170
150
130
110
90
70
50
50
70
90
110
130
150
170
Measured temperature (K)
Theoritical grain size (µm)
700
600
500
400
300
200
100
0
0
100
200
300
400
500
600
700
800
Measured grain size (µm)


a
b
c
d
e
-50
0
30
-30
-75
60
-60
90
-90
120
-120
150
-150
180
250
217
183
150
117
83
50
6.6x10⁻³
6.0x10⁻³
5.4x10⁻³
4.8x10⁻³
4.2x10⁻³
3.6x10⁻³
3.0x10⁻³
2.4x10⁻³
1.8x10⁻³
1.2x10⁻³
0.6x10⁻³
Crystalline Ice
Amorphous Ice
180
162
143
125
107
88
70
157
145
133
135
127
117
114
Reflectance
Wavelength (μm)
0.15
0.10
0.05
0.00
1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 3.5 4.0 4.5 5.0
0.006
0.004
0.002
0.000
3.0138 3.0969 3.1797

Cette section a présenté une application possible de la loi de dépendance de la signature spectrale de la glace d'eau avec la température et la taille de grains. D'autres applications peuvent être envisagées, comme l'étude d'un cratère récent dont la glace ne serait pas encore amorphisée ou contaminée par des particules environnantes. La section suivante, s'intéresse davantage au dioxyde de carbone. La détection de sa signature infrarouge à la surface des différentes lunes de glace ne permet pas forcément de comprendre son origine. En revanche, la connaissance de son état physique pourra nous aider à la deviner.

V.2 A la recherche du CO_2 sur les lunes de Jupiter et de Saturne

La glace d'eau est incontestablement présente sur une majorité des corps du système solaire externe. La glace d'eau à la surface des satellites galiléens a été décrite par Kuiper (1957), Harris (1961) et Moroz (1965), par détection spectrophotométrique avec des télescopes terrestres. Les observations spectroscopiques ont confirmé la présence de glace d'eau dans les années 70 (Johnson et McCord, 1971; Pilcher et al., 1972; Fink et al., 1973; Fink et Larson, 1975). Toutes les analyses montrent que la glace d'eau est le constituant majeur des surfaces des satellites saturniens et joviens (Dalton, 2010). La présence de dioxyde de carbone a également été détectée sur de nombreux satellites de glace (Dalton, 2010). Cependant, l'état physique du dioxyde de carbone à la surface des corps glacés est encore une question en suspens. La détection d'une bande d'absorption à 4,26 μm sur la signature spectrale des satellites de glace est admise comme associée à la présence de dioxyde de carbone piégé sous forme d'une inclusion fluide ou gazeuse.

Cette section vise à explorer les connaissances acquises sur le dioxyde de carbone sur les satellites joviens, d'une part, et saturniens, d'autre part. Une partie est consacrée à l'étude d'Europe pour lequel la présence de sels hydratés en fait une particularité.

V.2.1 Ganymède et Callisto

Ganymède et Callisto, décrits de manière exhaustive dans le premier chapitre, sont deux satellites de Jupiter. Les observations spectrales de ces satellites ont montré qu'il y avait de la glace d'eau sur leur surface. Les caractéristiques principales de la glace d'eau sont des bandes d'absorption à 1,05, 1,3, 1,5, 1,65 et 2 μm (McCord et al., 1997). Une forte absorption est présente au delà de 2,5 μm, (McCord et al., 1997), et la glace cristalline est repérée par le pic de Fresnel à 3,1 μm (Hansen et McCord, 2004). Clark (1980) montre que la signature spectrale de Callisto est similaire au spectre d'un bloc de glace en laboratoire, *i.e.* l'absorption à 1,5 μm est plus importante que la bande à 2 μm. Hansen et McCord (2004) étudient également la glace d'eau et expliquent que les surfaces de Ganymède et de Callisto sont recouvertes de glace cristalline et amorphe mais qu'il y a une proportion plus importante de glace cristalline sur Callisto.

La signature de la glace d'eau, à différentes tailles de grains, n'explique pas à elle seule toutes les caractéristiques spectrales observées sur les spectres infrarouges des corps naturels. D'autres constituants sont déterminés par des mesures en laboratoire et des modèles numériques. L'oxygène moléculaire a été détecté à la surface des satellites galiléens par Spencer et al. (1995), Calvin et al. (1996) et Calvin et Spencer (1997). L'oxygène moléculaire est un produit issu de la radiolyse de l'eau et peut être piégé dans la glace (Johnson et Jesser, 1997). Par ailleurs, l'irradiation de surfaces de glaces riches en oxygène peut produire de l'ozone (Teolis et al., 2006). Ces espèces ont par

ailleurs été découvertes à la surface de Ganymède (Noll et al., 1996). Le péroxyde d'hydrogène, produit par radiolyse de la glace d'eau, a également été détecté à la surface de Ganymède et de Callisto (Hendrix et al., 1999; Lopes et al., 2008).L'existence de bandes d'absorption près de 4,35 et 4,7 μm montrent la présence de liaisons C≡N sur Ganymède et Callisto (McCord et al., 1997). De même, une absorption à 4,5 μm caractérise la molécule HCN, celle à 4,57 μm les cyanogènes ($(CN)_2$) et le monoxyde de carbone signe à 4,67 μm (McCord et al., 1997). Ce dernier tend à disparaître au profit du dioxyde de carbone et de l'hydrogène par réaction avec la glace d'eau (McCord et al., 1997). Le dioxyde de soufre, détecté par Hibbitts et al. (2000), sous forme de givre, éventuellement piégé dans la glace, possède également une signature près de 3,35 μm qui peut être confondue avec la liaison C-H dont l'absorption est à 3,4 μm. Cependant, le groupe -CH_2 des hydrocarbures aliphatiques présente un doublet caractéristique dans cette gamme de longueur d'onde et le dioxyde de soufre signe également autour de 4,05 μm (McCord et al., 1997). Par ailleurs, le groupe fonctionel -SH possède une absorption entre 3,88 et 3,92 μm, (McCord et al., 1998a) et pourrait expliquer une absorption à 3,88 μm sur des spectres de Callisto et de Ganymède. Pourtant, H_2S pourrait également être la cause de cette absorption mais il n'est pas stable à la surface des satellites joviens (Schmitt et Rodriguez, 2003). Hage et al. (1998) expliquent cette absorption par la présence d'acide carbonique (H_2CO_3) produit par la radiolyse du dioxyde de carbone dans la glace (Moore et al., 1991). Des études menées par Calvin et Clark (1991), Calvin et Clark (1993) et Calvin et al. (1995) montrent la présence de phyllosilicates sous forme d'argiles ammoniaqués détectés par une absorption près de 3,1 μm.

Le dioxyde de carbone a également été repéré à la surface des satellites galiléens grâce à sa bande caractéristique à 4,25 μm (McCord et al., 1997). Le CO_2 solide, glace ou givre, est marqué sur les impacts de cratères récents sur Callisto. Son état n'est pas

stable sur des temps géologiques aux températures des corps des satellites de glace (140 à 160 K maximum). Pour qu'il soit encore présent à l'heure actuelle, le dioxyde de carbone est nécessairement piégé dans un autre composant (McCord et al., 1997). Un bloc de dioxyde de carbone ne peut subsister dans la matrice à la seule condition qu'une source de CO_2 soit présente pour compenser la sublimation de la glace. Cette source pourrait être issue d'un dégazage de matériaux sous la surface ou, au contraire, d'un processus de piégeage de volatile à la surface du satellite (McCord et al., 1997). Ce dioxyde de carbone dans une matrice, sous forme de clathrates (dont la formation commence sous 120 K (Blake et al., 1991)) ou piégé dans de la glace amorphe, (Bernstein et al., 2005; Gàlvez et al., 2007; Hibbitts et Szanyi, 2007; Hodyss et al., 2008; Gàlvez et al., 2008), est contraint par la structure du complexe ainsi formé et voit sa liberté de vibration diminuer. Sa longueur d'onde d'absorption est donc plus courte (McCord et al., 1997). Or, dans nos expériences, le dioxyde de carbone, dans le clathrate, signe entre 4,263 et 4,266 μm, le gaz à 4,274 μm et le dioxyde de carbone solide à 4,259 μm. Par ailleurs, les études effectuées en laboratoire montrent que ces positions ne dépendent pas (ou peu) de la température ou de la taille de grains. Ainsi, la molécule de dioxyde de carbone est contrainte de manière forte dans le solide. Le clathrate contraint également la vibration du dioxyde de carbone par rapport au gaz mais la molécule vibre de manière plus libre que dans le CO_2 solide. L'interprétation des signatures spectrales n'est pas facile. La position de différentes absorptions permet d'établir des hypothèses sur la présence de divers constituants.

Tous ces composants sont déterminés à partir des interprétations des signatures spectrales acquises par les différentes missions. Cependant, l'environnement dans lequel évoluent les satellites galiléens est à prendre en considération. En effet, ces satellites ne sont pas ou peu protégés des irradiations solaires ou de la magnétosphère de Jupiter. Les

différentes molécules à leur surface peuvent être altérées et dissociées naturellement. Du carbone graphite pourrait alors être présent à la surface des satellites, assombrissant ainsi leurs signatures spectrales et formant, par conséquent, des zones sombres.

V.2.2 Europe

La détermination de la composition des différentes unités qui constituent la surface d'Europe permettra de contraindre davantage les modèles géophysiques qui cherchent à comprendre l'évolution du satellite. En effet, des connaissances sur la surface aideront à contraindre les modèles sur l'épaisseur de croûte, le gradient thermique, l'épaisseur, la température et les mouvements de convection de l'océan interne, les processus de radiolyse, les propriétés thermiques et rhéologiques, l'activité géologique, le cryomagmatisme et la biochimie ou le potentiel astrobiologique (Dalton et al., 2005; Kargel et al., 2000; Stevenson, 2000; Chyba et Phillips, 2001; Prieto-Ballesteros et Kargel, 2005). La glace d'eau est le constituant majoritaire de la surface d'Europe (Pilcher et al., 1972; Clark et Mc Cord, 1980; Clark, 1981b). La glace d'eau d'Europe est majoritairement amorphe (Hansen et McCord, 2004; Dalton et al., 2010). D'autres éléments sont détectés à la surface grâce aux spectres infrarouges qui révèlent des bandes d'absorption différentes de la glace d'eau pure. Ces composants sont repérés dans des unités géologiques telles que les lignes, les bandes, les terrains chaotiques (voir chapitre I), (Spaun et al., 1998; Fanale et al., 1999, 2000; Head et Pappalardo, 1999; Greeley et al., 2000). Les constituants proposés pour expliquer les différences dans les signatures spectrales observées et celle de la glace d'eau sont le peroxyde d'hydrogène (Carlson et al., 1999a; Hansen et McCord, 2004), l'oxygène (Spencer et Calvin, 2002), des ions sodium et potassium atmosphériques (Johnson et al., 2002), le dioxyde de soufre (Eviatar et al.,

1981; Lane et al., 1981), le dioxyde de carbone (Smythe et al., 1998; Carlson, 2001), dont la position de l'absorption à 4,25 μm indique qu'il serait lié à, ou contenu dans, une matrice hôte qui le prive d'une certaine liberté (Farrell et Newnham, 1967; Wood et Nassau, 1967; Fink et Sill, 1982; Salisbury et al., 1991; McCord et al., 1998a). Cette matrice pourrait être un minéral, un constituant issu de la radiolyse, un composant organique ou encore la glace d'eau elle-même (Dalton et al., 2005). Dans ce dernier cas, les clathrates de dioxyde de carbone à quelques millimètres sous la surface pourraient être des structures à l'origine de cette absorption (Prieto-Ballesteros et al., 2005). Cependant, le transport de ce type de matériaux entre les profondeurs et la surface n'est pas encore bien compris. Des arguments sont proposés dans les deux directions (Ip et al., 1998; Pappalardo et al., 1999; Greenberg et al., 1999; Collins et al., 2000; Cooper et al., 2001; Carlson et al., 2002; Nimmo et Manga, 2002; Goodman et al., 2004). Cette matrice pourrait également être des minéraux hydratés (McCord et al., 1998b, 1999, 2001b, 2002, 2010). Le spectre de clathrates de CO_2 peut expliquer le creux à 2,7 μm corrélés avec l'absorption à 4,27 μm mais ne peut pas expliquer les déformations des bandes d'eau. McCord et al. (1998a) montrent une signature spectrale à 2,7 μm sur certains spectres de Ganymède et McCord et al. (2010) présentent des spectres d'Europe sur lesquels une bande à 2.7 μm est clairement visible, mais elle n'est pas le propos de l'article. La figure V.6 représente un cube hyperspectral obtenu par une collaboration avec Jean-Philippe Combe et Tom McCord. La zone E de la figure V.6a est définie par McCord et al. (2010) comme un pôle pur d'un constituant indéterminé. Ce spectre n'est pas une combinaison linéaire des autres pôles purs de l'image qui sont des matériaux hydratés. Cette bande pourrait tout à fait indiquer la présence de clathrates de CO_2 à la surface ou en subsurface d'Europe mais leur « survie » à la surface des lunes de glace est très controversée et forcément métastable. Cependant, cette petite zone pourrait être

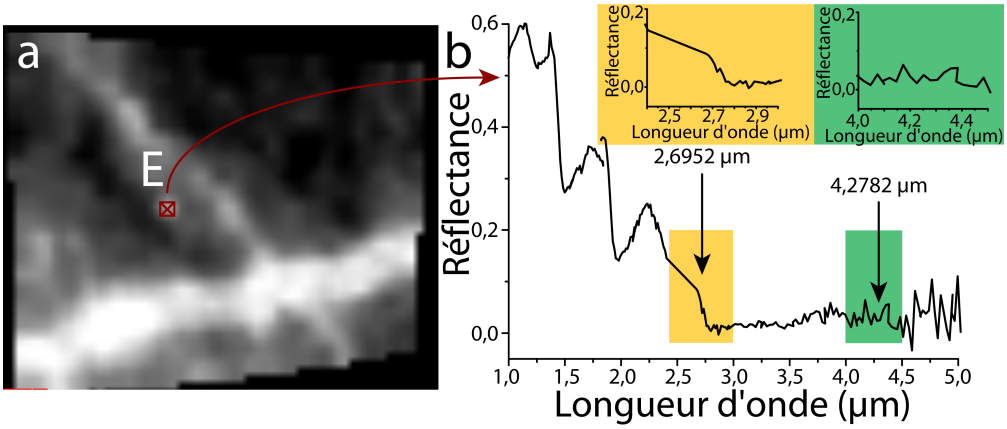


FIGURE V.6 – a) Image de la bande 92 à 1,5110 μm du cube hyperspectral de NIMS e6e007ci. La zone notée E est une unité spectrale définie par McCord et al. (2010). b) Spectre brut associé à l'unité E. La bande autour de 2,7 μm est clairement visible sur cette zone. Une double bande est également observable à 4,2256 et 4,2782 μm, positions spectrales des canaux NIMS.

un cratère récent (J-P Combe, communication privée) qui exposerait des constituants de la subsurface en surface. La présence de clathrates sur cette zone est alors justifiable, s'ils n'ont pas encore été dissociés. Par ailleurs, la déformation présente sur ce spectre, figure V.6b, montre que le clathrate de CO_2 n'est pas pur sur cette zone. Les minéraux hydratés semblent expliquer les déformations dans les spectres de l'eau (McCord et al., 1999; Fanale et al., 1999; McCord et al., 2001b; Dalton et al., 2005) et sont en plus prévus par des arguments géochimiques (Kargel, 1991, 2001), mais ils sont plus difficiles à produire par radiolyse.

V.2.3 La bande à 2,7 μm sur les satellites saturniens

D'autres satellites de glace ont été étudiés dans le système saturnien. La présence majoritaire de glace d'eau à la surface des satellites saturniens est connue depuis fort longtemps (Fink et Larson, 1975; Clark et al., 1984, 1986; Roush et al., 1995; Cruik-

shank, 1998; Owen et al., 2001; Cruikshank et al., 2005; Clark et al., 2005b, 2008; Filacchione et al., 2007, 2008), grâce à l'analyse infrarouge de leur surface. Des bandes caractéristiques de la glace sont clairement présentes à 1,5, 2,0, 3,0 et 4,5 μm. Des absorptions plus fines sont également visibles à 1,04 et 1,25 μm sur les spectres des régions plus brillantes, où la glace d'eau est plus pure (Jaumann et al., 2009). Certains corps glacés présentent aussi une bande d'absorption autour de 4,25 μm. Du dioxyde de carbone piégé dans la glace a ainsi été détecté sur Japet (Buratti et al., 2005), sur Phoebe (Clark et al., 2005b), sur Hypérion (Cruikshank et al., 2007) et sur Encelade (Brown et al., 2006). D'autres petits corps comme Dione, Thétys, Mimas ou Rhéa présentent également une faible absorption de CO_2 (Clark et al., 2008).

Encelade

L'analyse des rapports de composition des différents constituants de la vapeur et des particules des geysers d'Encelade montre qu'il est possible qu'un réservoir de clathrates existe sous la surface. Kieffer et al. (2006) suggèrent que l'eau et les autres gaz à la sortie des geysers d'Encelade sont libérés par dépressurisation des clathrates à basse température (inférieure à 200 K). Cependant, lors de la dépressurisation, les clathrates ne relâchent pas forcément tous les constituants, seuls les plus volatiles sont expulsés (Spencer et al., 2009). Si les clathrates de dioxyde de carbone existent sur Encelade, leur détection est plus probable au niveau des Tiger Stripes. Ainsi, la moyenne spectrale des spectres acquis sur des pixels représentatifs des Tiger Stripes a été calculée.

La figure V.7 représente le spectre moyen des spectres des Tiger Stripes sur l'image CM_1500061286_1·cub utilisée pour l'étude des distributions de température et de taille de grains sur le pôle Sud d'Encelade. Une inflexion à 2,7 μm est très légèrement visible sur ce spectre. La présence des clathrates de dioxyde de carbone au niveau

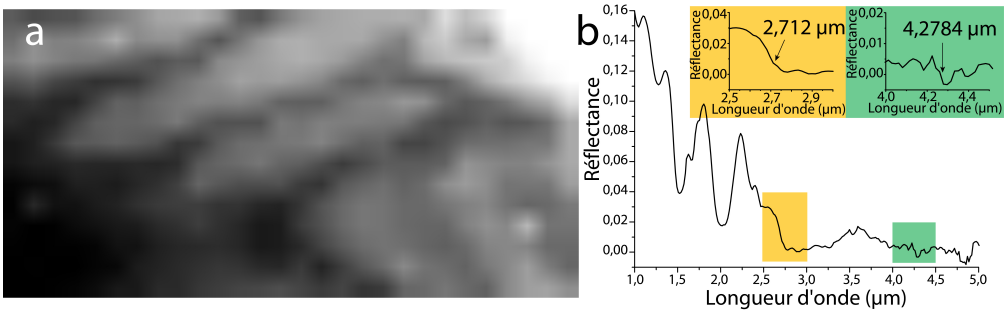


FIGURE V.7 – a) Image de la bande 208 à 2,712 μm du cube hyperspectral de VIMS, CM_1500061286_1·cub. b) Spectre moyen calculé sur l'ensemble des données brutes des pixels associés aux Tiger Stripes. La bande à 2,7 μm est légèrement visible sur ce spectre. Une large bande est également observable à 4,2784 μm, position spectrale du canal VIMS.

des Tiger Stripes est peu observable, l'activité géologique au pôle Sud d'Encelade ne favorise pas la stabilité des clathrates s'ils sont présents.

Phoebe

La répartition du dioxyde de carbone à la surface de Phoebe est étendue. L'apparence primitive de ce corps et la position de l'absorption caractéristique du dioxyde de carbone à 4,266 μm suggèrent une origine endogène du CO_2 sur Phoebe, (Cruikshank et al., 2010), *i.e.* le dioxyde de carbone aurait survécu à la surface du satellite depuis sa condensation et son accrétion originelle. Le dioxyde de carbone à l'état de volatile doit être perdu par évaporation bien que la structure clathrate lui offre une stabilité plus importante en diminuant significativement sa pression de sublimation. Ainsi, si le dioxyde de carbone sur Phoebe est piégé dans une structure clathrate, alors sa stabilité à long terme est améliorée (Cruikshank et al., 2010). De plus, Clark et al. (2005b) évaluent une bande autour de 2,72 μm qu'ils interprètent par la présence de phyllosilicates.

Cette bande pourrait également être interprétée en lien avec la bande à 4,26 μm, (Clark et al., 2005b), comme des clathrates de dioxyde de carbone. La figure V.8 montre

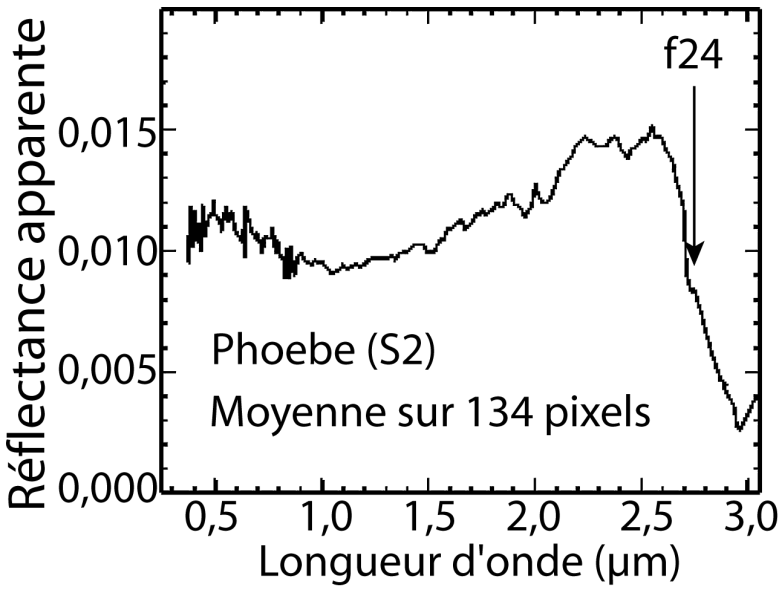


FIGURE V.8 – Spectre moyen calculé sur 134 pixels de Phoebe, d'après Clark et al. (2005b). f24 indique une bande d'absorption à 2,72 μm clairement visible sur ce spectre.

la partie du spectre de Phoebe, obtenu par VIMS, entre 0,5 et 3,0 μm dans laquelle une absorption à 2,72 μm est visible et que Clark et al. (2005b) interprètent comme des phyllosilicates. Les clathrates de dioxyde de carbone sont, certes, métastables à la surface des satellites de glace mais il est probable que les phyllosilicates le soient également.

D'autres satellites

Les absorptions caractéristiques du dioxyde de carbone autour de 4,253 μm sur Hypérion, Dione et Japet, suggèrent une source de dioxyde de carbone par irradiation de la glace d'eau ou un bombardement micrométéoritique (Palmer et Brown, 2007; Cruikshank et al., 2010). Cruikshank et al. (2010) n'excluent pas la présence de clathrates de dioxyde de carbone sur ces satellites. Cependant, aucune bande à 2,7 μm n'a été détectée sur ces trois satellites pour le moment.

V.2.4 La bande à 4,92 μm

Une bande d'absorption a été détectée à 4,92 μm sur Titan (McCord et al., 2008). Le dioxyde de carbone solide analysé en laboratoire possède une absorption à 4,89 μm (voir Chapitre IV) et les modèles suggèrent également la présence de cette bande spectrale (Hansen, 1997). Le décalage de la bande ne peut pas être la preuve d'une clathratation du dioxyde de carbone. En effet, la signature spectrale des clathrates de CO_2 ne présente pas de bande d'absorption à 4,92 μm, ni même à 4,89 μm. Par ailleurs, le dioxyde de carbone gazeux ne possède pas non plus de bande d'absorption dans cette région. Ainsi, la signature spectrale du CO_2 dans le clathrate est similaire à celle du dioxyde de carbone gazeux dans ce domaine de longueur d'onde et le décalage de cette bande d'absorption visible sur les satellites de glace ne révèle pas la présence de clathrates de dioxyde de carbone. McCord et al. (2008) suggèrent que la bande à 4,92 μm est due à la présence de dioxyde de carbone solide et que le décalage de cette bande est provoquée par un mélange intime avec d'autres constituants qui pourraient altérer sa fréquence de vibration. D'après ces auteurs, le décalage de la bande serait au plus de 13 nm ce qui rentre dans l'incertitude des mesures VIMS.

Ce dernier chapitre a présenté l'ensemble des applications d'intérêt planétologique qui ont pu être effectuées grâce aux études des signatures spectrales en laboratoire. L'étude approfondie des spectres de glace d'eau a permis de réaliser des cartes de distribution de la température et de la taille de grains au pôle Sud d'Encelade. Ces cartes, calculées à partir des spectres infrarouges acquis par VIMS, montrent des résultats similaires en température (obtenus avec une méthode complémentaire basée sur l'emission thermique) et en taille de grains aux données de la littérature. Cette étude a fait l'objet d'un article scientifique. Par ailleurs, des recherches ont été menées sur la détection du dioxyde de carbone à la surface des lunes de glace joviennes et saturniennes. Le dioxyde de carbone a pu être observé grâce à son absorption à 4,26 μm. Cependant, l'état physique de ce constituant reste une question. La deuxième partie de ce chapitre a démontré que le dioxyde de carbone pouvait être piégé sous forme de clathrates de CO_2 en subsurface des satellites de glace. La détection d'une bande d'absorption à 2,7 μm plus intense à la surface de Phoebe et d'Europe est probablement due à la découverte de la subsurface par un phénomène quelconque, comme un impact de cratère récent.

Conclusion

La majorité de cette étude a été orientée vers le développement expérimental des appareils. Le cryostat à azote liquide a été modifié à plusieurs reprises pour l'analyse des différents constituants, aux échelles microscopique et macroscopique. D'abord, la conception d'un nouveau couvercle, d'un nouveau porte échantillon, l'utilisation de l'Infragold© et l'élaboration d'un protocole de tamisage ont permis l'acquisition de spectres de glace d'eau dont le taux de pollution était minimisé et la taille de grains contrainte. Les images des grains de glace obtenues à travers un microscope dans la chambre froide donnent une vision globale des échantillons. Ensuite, la fabrication d'une cellule innovante à atmosphère contrôlée a fourni pour la première fois au laboratoire des signatures spectrales de grains de glace de dioxyde de carbone pure. Des spectres de mélange de glaces d'eau et de dioxyde de carbone ont également été obtenus avec cette cellule. Enfin, la synthèse de clathrates de dioxyde de carbone en autoclave produit une quantité suffisante d'échantillons pour que les grains soient broyés et tamisés. Par ailleurs, le dispositif expérimental contrôle la température des échantillons lors de l'acquisition des spectres. Les signatures spectrales sont, par conséquent, contraintes en température et en taille de grains.

L'ensemble des ces analyses a fourni des signatures spectrales contraintes en température et en taille de grains. Les données acquises sur la glace d'eau ont été examinées de

manière à obtenir une loi entre les caractéristiques spectrales, la température et la taille de grains. L'ajustement des spectres par sommation de fonctions gaussiennes montre que les paramètres des courbes gaussiennes sont difficilement reliables à la température et à la taille de grains. Aussi, l'étude des aires des bandes d'absorption qui a été réalisée, traduit la dépendance de ces caractéristiques spectrales avec la température et la taille de grains. Les aires des absorptions à 1,05, 1,30 et 1,50 μm subissent clairement l'unique influence de la taille de grains entre 80 et 140 K. En revanche, les aires réduites subissent principalement l'effet de température. Un programme numérique rédigé au cours de cette étude détermine la température et la taille de grains d'un spectre de glace cristalline à partir de ses caractéristiques spectrales (les aires et les aires réduites).

L'étude des signatures spectrales des autres constituants n'a pas été aussi approfondie que celle de la glace d'eau, faute de temps. Cependant, des études préliminaires d'ajustement par sommation de fonctions gaussiennes n'ont pas montré de dépendances nettes des larges absorptions à 2,7 et 4,2 μm du dioxyde de carbone solide. En revanche, les centres des gaussiennes des trois fines bandes à 1,96, 2,01 et 2,07 μm présentent une dépendance certaine en température. Malheureusement, ces bandes d'absorption ne sont pas ou peu visibles sur les spectres de clathrates de dioxyde de carbone et encore moins à la surface de lunes d'intérêt pour l'étude, pour lesquelles la résolution spectrale est limitée. L'analyse des positions des bandes d'absorption montre un décalage explicite entre la position des bandes d'absorption à 2,7 μm de la glace de dioxyde de carbone et les clathrates de CO_2. Cette bande est, par ailleurs, une caractéristique spectrale observable facilement sur les spectres de clathrate de dioxyde de carbone, même en cas de mélange (ou pollution) avec la glace d'eau. L'étude de l'aire de cette bande permet de déterminer grossièrement la température de dissociation des clathrates en surface de l'échantillon. D'autres études pourraient être envisagées pour affiner les diagrammes

de phases (P, T) de la stabilité des clathrates de CO_2 grâce à cette caractéristique. La détermination de la longueur d'onde de $^{12}\nu_{CO_2}$ du dioxyde de carbone à 4,2 μm reste difficile.

L'analyse en laboratoire des glaces d'eau et de dioxyde de carbone pures ainsi que leur mélange et les clathrates de CO_2, permet la détermination de la composition des surfaces des satellites de glace. D'une part, l'étude approfondie de la glace d'eau et l'élaboration d'une loi de dépendance de sa signature spectrale avec la température et la taille de grains a fourni deux cartes de répartition en température et en taille de grains du pôle Sud d'Encelade. Ces cartes ont été calculées à partir des images hyperspectrales acquises par le spectro-imageur VIMS à bord de Cassini. Les résultats de cette étude ont montré que la température des Tiger Stripes atteignait 130 K pour une taille de grains de 250 μm. D'autre part, l'étude du dioxyde de carbone à la surface des satellites joviens et saturniens montre que les clathrates de CO_2 peuvent être présent en subsurface. La présence d'une bande d'absorption à 2,7 μm, plus intense, sur certains satellites (principalement Europe et Phoebe) pourrait être interprétée comme des clathrates de dioxyde de carbone en subsurface découvert par un éventuel impact. Cependant, la subsistance de ces constituants en surface paraît être assez courte à cause des radiations et des bombardements que subissent les lunes de glace dans les magnétosphères jovienne et saturnienne.

Par la suite, la loi de dépendance des caractéristiques spectrales de la glace d'eau pourra être utilisée sur d'autres objets, à condition qu'ils soient constitués de glace d'eau cristalline pure, pour en déterminer la température et la taille de grains. Des études en laboratoire sur la glace amorphe pourront être menées pour élaborer une loi de dépendance des mêmes caractéristiques spectrales ou d'autres avec la température et la taille de grains. Pour la glace amorphe, il faudra sans doute examiner en détail les variations

de la réflectance de Fresnel à 3,1 μm et de la bande d'absorption à 1,65 μm. Par ailleurs, les résultats obtenus sur l'influence du dioxyde de carbone sur la signature spectrale de la glace d'eau pourront être approfondis par davantage d'expériences qui renforceront les études déjà effectuées et permettront peut être d'établir d'autres relations entre les caractéristiques spectrales du dioxyde de carbone et l'état physique dans lequel il est analysé, *i.e.* sous forme solide dans un mélange ou dans une structure clathrate. Les spectres des objets naturels ont une faible résolution spectrale mais des interprétations sur la présence de clathrates peuvent être envisagées. D'autres missions, munies de spectro-imageurs de meilleures résolutions spectrale et spatiale, permettront à coup sûr d'améliorer nos connaissances sur la composition des planètes observées et donneront la possibilité d'enrichir ou d'établir des théories sur la formation du système solaire, et plus particulièrement, de notre Terre.

Annexe A

Les manips

Liste des expériences sur les échantillons macroscopiques de glace d'eau non tamisés (voir section III.1).

Nom	N° Spectre	T (K)	P (bar)	$D_{estimée}$ (μm)
17032009GI	5	180	1,4x10^{-4}	274
	6	170	1,4x10^{-4}	274
	7	160	1,5x10^{-4}	274
	8	150	1,5x10^{-4}	274
	9	140	1,6x10^{-4}	274
	10	130	1,6x10^{-4}	274
	11	120	1,7x10^{-4}	274
	12	110	1,6x10^{-4}	274
	13	100	1,6x10^{-4}	274
	14	90	1,6x10^{-4}	274
	15	80	1,6x10^{-4}	274

Nom	N° Spectre	T (K)	P (bar)	$D_{estimée}$ (μm)
17032009GL	19	180	0,92x10^{-4}	1023
	20	170	0,90x10^{-4}	1023
	21	160	0,89x10^{-4}	1023
	22	150	0,89x10^{-4}	1023
	23	140	0,88x10^{-4}	1023
	24	130	0,88x10^{-4}	1023
	25	120	0,87x10^{-4}	1023
	26	110	0,86x10^{-4}	1023
	27	100	0,86x10^{-4}	1023
	28	90	0,86x10^{-4}	1023
	29	80	0,87x10^{-4}	1023
09042009GI	16	180	2,8x10^{-4}	690
	17	170	2,8x10^{-4}	690
	18	160	2,7x10^{-4}	690
	19	150	2,7x10^{-4}	690
	20	140	2,7x10^{-4}	690
	21	130	2,7x10^{-4}	690
	22	120	2,7x10^{-4}	690
	23	110	2,6x10^{-4}	690
	24	100	2,6x10^{-4}	690
	25	90	2,6x10^{-4}	690
	26	80	2,5x10^{-4}	690

Nom	N° Spectre	T (K)	P (bar)	$D_{estimée}$ (μm)
10042009GL	3	180	2,1x10^{-4}	755
	4	170	2,2x10^{-4}	755
	5	160	2,1x10^{-4}	755
	6	150	2,1x10^{-4}	755
	7	140	2,1x10^{-4}	755
	8	130	2,1x10^{-4}	755
	9	120	2,1x10^{-4}	755
	10	110	2,0x10^{-4}	755
	11	100	2,0x10^{-4}	755
	12	90	2,0x10^{-4}	755
	13	80	2,0x10^{-4}	755
10042009GI	16	180	1,8x10^{-4}	768
	17	170	1,8x10^{-4}	768
	18	160	1,8x10^{-4}	768
	19	150	1,8x10^{-4}	768
	20	140	1,9x10^{-4}	768
	21	130	1,9x10^{-4}	768
	22	120	1,9x10^{-4}	768
	23	110	1,9x10^{-4}	768
	24	100	1,9x10^{-4}	768
	25	90	1,9x10^{-4}	768
	26	80	1,9x10^{-4}	768

Nom	N° Spectre	T (K)	P (bar)	$D_{estimée}$ (μm)
14042009GL	3	180	2,2x10^{-4}	678
	4	170	2,2x10^{-4}	678
	5	160	2,2x10^{-4}	678
	6	150	2,1x10^{-4}	678
	7	140	2,2x10^{-4}	678
	8	130	2,2x10^{-4}	678
	9	120	2,2x10^{-4}	678
	10	110	2,2x10^{-4}	678
	11	100	2,1x10^{-4}	678
	12	90	2,1x10^{-4}	678
	13	80	2,1x10^{-4}	678
14042009GI	16	180	1,6x10^{-4}	188
	17	170	1,6x10^{-4}	188
	18	160	1,7x10^{-4}	188
	19	150	1,7x10^{-4}	188
	20	140	1,7x10^{-4}	188
	21	130	1,8x10^{-4}	188
	22	120	1,8x10^{-4}	188
	23	110	1,8x10^{-4}	188
	24	100	1,8x10^{-4}	188
	25	90	1,8x10^{-4}	188
	26	80	1,8x10^{-4}	188

Nom	N° Spectre	T (K)	P (bar)	$D_{estimée}$ (μm)
15042009GL1	3	180	1,9x10^{-4}	585
	4	170	1,9x10^{-4}	585
	5	160	2,0x10^{-4}	585
	6	150	2,0x10^{-4}	585
	7	140	1,9x10^{-4}	585
	8	130	1,9x10^{-4}	585
	9	120	1,9x10^{-4}	585
	10	110	1,9x10^{-4}	585
	11	100	1,9x10^{-4}	585
	12	90	1,9x10^{-4}	585
	13	80	1,9x10^{-4}	585
15042009GI1	16	180	1,5x10^{-4}	612
	17	170	1,5x10^{-4}	612
	18	160	1,5x10^{-4}	612
	19	150	1,5x10^{-4}	612
	20	140	1,5x10^{-4}	612
	21	130	1,5x10^{-4}	612
	22	120	1,5x10^{-4}	612
	23	110	1,5x10^{-4}	612
	24	100	1,5x10^{-4}	612
	25	90	1,5x10^{-4}	612
	26	80	1,5x10^{-4}	612

Nom	N° Spectre	T (K)	P (bar)	$D_{estimée}$ (μm)
15042009GL2	29	180	1,4x10^{-4}	557
	30	170	1,4x10^{-4}	557
	31	160	1,4x10^{-4}	557
	32	150	1,4x10^{-4}	557
	33	140	1,4x10^{-4}	557
	34	130	1,4x10^{-4}	557
	35	120	1,4x10^{-4}	557
	36	110	1,3x10^{-4}	557
	37	100	1,3x10^{-4}	557
	38	90	1,3x10^{-4}	557
	39	80	1,3x10^{-4}	557
15042009GI2	42	180	1,4x10^{-4}	542
	43	170	1,4x10^{-4}	542
	44	160	1,4x10^{-4}	542
	45	150	1,4x10^{-4}	542
	46	140	1,4x10^{-4}	542
	47	130	1,4x10^{-4}	542
	48	120	1,4x10^{-4}	542
	49	110	1,4x10^{-4}	542
	50	100	1,4x10^{-4}	542
	51	90	1,1x10^{-4}	542
	52	80	1,1x10^{-4}	542

Nom	N° Spectre	T (K)	P (bar)	$D_{estimée}$ (μm)
16042009GL	3	180	2,2x10^{-4}	686
	4	170	2,2x10^{-4}	686
	5	160	2,1x10^{-4}	686
	6	150	2,1x10^{-4}	686
	7	140	2,1x10^{-4}	686
	8	130	2,0x10^{-4}	686
	9	120	2,0x10^{-4}	686
	10	110	2,0x10^{-4}	686
	11	100	1,9x10^{-4}	686
	12	90	2,0x10^{-4}	686
	13	80	2,0x10^{-4}	686
16042009GI	16	180	1,2x10^{-4}	268
	17	170	1,2x10^{-4}	268
	18	160	1,2x10^{-4}	268
	19	150	1,2x10^{-4}	268
	20	140	1,2x10^{-4}	268
	21	130	1,2x10^{-4}	268
	22	120	1,2x10^{-4}	268
	23	110	1,3x10^{-4}	268
	24	100	1,3x10^{-4}	268
	25	90	1,3x10^{-4}	268
	26	80	1,4x10^{-4}	268

Nom	N° Spectre	T (K)	P (bar)	$D_{estimée}$ (μm)
24042009GL	1	80	1,7x10^{-4}	473
	2	80	1,7x10^{-4}	473
	3	80	1,7x10^{-4}	473
	4	80	1,7x10^{-4}	473
	5	100	1,7x10^{-4}	473
	6	100	1,7x10^{-4}	473
	7	100	1,7x10^{-4}	473
	8	100	1,7x10^{-4}	473
	9	120	1,6x10^{-4}	473
	10	120	1,6x10^{-4}	473
	11	120	1,6x10^{-4}	473
	12	120	1,5x10^{-4}	473
	13	140	1,4x10^{-4}	473
	14	140	1,4x10^{-4}	473
	15	140	1,3x10^{-4}	473
	16	140	1,3x10^{-4}	473
	17	160	1,3x10^{-4}	473
	18	160	1,2x10^{-4}	473
	19	160	1,2x10^{-4}	473
	20	160	1,2x10^{-4}	473
	21	180	1,2x10^{-4}	473
	22	180	1,2x10^{-4}	473

Nom	N° Spectre	T (K)	P (bar)	$D_{estimée}$ (μm)
	23	180	1,2x10^{-4}	473
	24	180	1,2x10^{-4}	473

Liste des expériences sur les échantillons macroscopiques de glace d'eau tamisés (voir section III.1).

Nom	N° Spectre	T (K)	ΔT (K)	P (bar)	$D_{mesurée}$ (μm)	ΔD (μm)
09022010	1	80	0,5	3.10^{-4}	272	92
	2	80	0,5	3.10^{-4}	272	92
	3	80	0,5	3.10^{-4}	272	92
	4	90	0,5	3.10^{-4}	272	92
	5	90	1	3.10^{-4}	272	92
	6	90	0,5	3.10^{-4}	272	92
	7	100	0,4	3.10^{-4}	272	92
	8	100	0,8	3.10^{-4}	272	92
	9	100	0,5	3.10^{-4}	272	92
	10	110	0,5	3.10^{-4}	272	92
	11	110	0,9	3.10^{-4}	272	92
	12	110	1	3.10^{-4}	272	92
	13	120	2,1	3.10^{-4}	272	92
	14	120	0,8	3.10^{-4}	272	92
	15	120	0,6	3.10^{-4}	272	92
	16	130	1,7	3.10^{-4}	272	92
	17	130	1,8	3.10^{-4}	272	92
	18	130	1,6	3.10^{-4}	272	92
	19	140	0,6	3.10^{-4}	272	92
	20	140	0,6	$2,9.10^{-4}$	272	92
	21	140	0,7	$2,9.10^{-4}$	272	92

Nom	N° Spectre	T (K)	ΔT (K)	P (bar)	$D_{mesurée}$ (μm)	ΔD (μm)
	22	150	0,5	3.10^{-4}	272	92
	23	150	0,4	$2{,}9.10^{-4}$	272	92
	24	150	0,2	$2{,}9.10^{-4}$	272	92
10022010	1	76	0,3	$1{,}4.10^{-4}$	185	67
	2	76	0,5	$1{,}3.10^{-4}$	185	67
	3	76	0,5	$1{,}3.10^{-4}$	185	67
	4	80	0,8	$1{,}3.10^{-4}$	185	67
	5	80	0,7	$1{,}2.10^{-4}$	185	67
	6	80	0,7	$1{,}2.10^{-4}$	185	67
	7	90	0,7	$1{,}2.10^{-4}$	185	67
	8	90	0,8	$1{,}2.10^{-4}$	185	67
	9	90	0,4	$1{,}2.10^{-4}$	185	67
	10	100	0,6	$1{,}1.10^{-4}$	185	67
	11	100	0,5	$1{,}1.10^{-4}$	185	67
	12	100	0,4	$1{,}1.10^{-4}$	185	67
	13	110	0,8	$1{,}1.10^{-4}$	185	67
	14	110	0,4	$1{,}1.10^{-4}$	185	67
	15	110	0,6	$1{,}1.10^{-4}$	185	67
	16	120	0,7	$1{,}1.10^{-4}$	185	67
	17	120	0,8	$1{,}1.10^{-4}$	185	67
	18	120	0,4	$1{,}1.10^{-4}$	185	67
	19	130	0,5	$1{,}1.10^{-4}$	185	67

Nom	N° Spectre	T (K)	ΔT (K)	P (bar)	$D_{mesurée}$ (μm)	ΔD (μm)
	20	130	0,6	$1{,}1.10^{-4}$	185	67
	21	130	0,6	$1{,}1.10^{-4}$	185	67
	22	140	0,4	$1{,}1.10^{-4}$	185	67
	23	140	0,6	$1{,}1.10^{-4}$	185	67
	24	140	0,6	$1{,}1.10^{-4}$	185	67
	25	150	0,5	$1{,}1.10^{-4}$	185	67
	26	150	0,4	$1{,}1.10^{-4}$	185	67
	27	150	0,4	$1{,}1.10^{-4}$	185	67
	28	150	0,4	$1{,}1.10^{-4}$	185	67
	29	160	0,3	$1{,}1.10^{-4}$	185	67
	30	160	0,5	$1{,}1.10^{-4}$	185	67
	31	160	0,4	$1{,}1.10^{-4}$	185	67
	32	170	0,5	$1{,}1.10^{-4}$	185	67
	33	170	0,3	$1{,}05.10^{-4}$	185	67
	34	170	0,5	$1{,}05.10^{-4}$	185	67
	35	180	0,4	$1{,}1.10^{-4}$	185	67
	36	180	0,2	$1{,}1.10^{-4}$	185	67
	37	180	0,5	$1{,}1.10^{-4}$	185	67
	38	180	0,4	$1{,}1.10^{-4}$	185	67
	39	180	0,3	$1{,}1.10^{-4}$	185	67
	67	190	0,2	$1{,}1.10^{-4}$	185	67
	41	190	0,5	$1{,}1.10^{-4}$	185	67

Nom	N° Spectre	T (K)	ΔT (K)	P (bar)	$D_{mesurée}$ (μm)	ΔD (μm)
	42	190	0,3	$1{,}1.10^{-4}$	185	67
	43	200	0,5	$1{,}1.10^{-4}$	185	67
	44	200	0,2	$1{,}1.10^{-4}$	185	67
	45	200	0,3	$1{,}1.10^{-4}$	185	67
	46	76	0,3	$1{,}1.10^{-4}$	185	67
15022010	1	76	0,2	$1{,}7.10^{-4}$	795	213
	2	76	0,2	$1{,}7.10^{-4}$	795	213
	3	76	0,2	$1{,}7.10^{-4}$	795	213
	4	80	0,4	$1{,}7.10^{-4}$	795	213
	5	80	0,4	$1{,}7.10^{-4}$	795	213
	6	80	0,5	$1{,}7.10^{-4}$	795	213
	7	90	0,3	$1{,}7.10^{-4}$	795	213
	8	90	0,4	$1{,}7.10^{-4}$	795	213
	9	90	0,4	$1{,}7.10^{-4}$	795	213
	10	100	0,6	$1{,}6.10^{-4}$	795	213
	11	100	0,5	$1{,}6.10^{-4}$	795	213
	12	100	0,5	$1{,}5.10^{-4}$	795	213
	13	110	0,6	$1{,}5.10^{-4}$	795	213
	14	110	0,7	$1{,}5.10^{-4}$	795	213
	15	110	0,4	$1{,}5.10^{-4}$	795	213
	16	120	0,8	$1{,}4.10^{-4}$	795	213
	17	120	0,6	$1{,}45.10^{-4}$	795	213

Nom	N° Spectre	T (K)	ΔT (K)	P (bar)	$D_{mesurée}$ (μm)	ΔD (μm)
	18	120	0,5	$1{,}5.10^{-4}$	795	213
	19	130	0,4	$1{,}4.10^{-4}$	795	213
	20	130	0,3	$1{,}4.10^{-4}$	795	213
	21	130	0,3	$1{,}4.10^{-4}$	795	213
	22	140	0,6	$1{,}4.10^{-4}$	795	213
	23	140	0,4	$1{,}4.10^{-4}$	795	213
	24	140	0,4	$1{,}3.10^{-4}$	795	213
	25	150	0,6	$1{,}3.10^{-4}$	795	213
	26	150	0,8	$1{,}3.10^{-4}$	795	213
	27	150	0,5	$1{,}3.10^{-4}$	795	213
	28	160	0,8	$1{,}3.10^{-4}$	795	213
	29	160	0,7	$1{,}3.10^{-4}$	795	213
	30	160	0,5	$1{,}3.10^{-4}$	795	213
	31	170	0,5	$1{,}3.10^{-4}$	795	213
	32	170	0,6	$1{,}3.10^{-4}$	795	213
	33	170	0,7	$1{,}3.10^{-4}$	795	213
	34	180	0,4	$1{,}3.10^{-4}$	795	213
	35	180	0,2	$1{,}3.10^{-4}$	795	213
	36	180	0,2	$1{,}3.10^{-4}$	795	213
	37	190	0,3	$1{,}3.10^{-4}$	795	213
	38	190	0,1	$1{,}3.10^{-4}$	795	213
	39	190	0,3	$1{,}3.10^{-4}$	795	213

Nom	N° Spectre	T (K)	ΔT (K)	P (bar)	$D_{mesurée}$ (μm)	ΔD (μm)
	40	200	0,8	$1{,}2.10^{-4}$	795	213
	41	200	0,3	$1{,}2.10^{-4}$	795	213
	42	200	0,2	$1{,}2.10^{-4}$	795	213
	43	76	0,2	$1{,}5.10^{-4}$	795	213
17022010	1	75,54	2,1	$1{,}4.10^{-4}$	385	122,5
	2	75,54	2,2	$1{,}3.10^{-4}$	385	122,5
	3	81,30	3,6	$1{,}1.10^{-4}$	385	122,5
	4	95,68	6,8	$1{,}0.10^{-4}$	385	122,5
	5	110,07	9,8	$0{,}98.10^{-4}$	385	122,5
	6	124,46	12,2	$0{,}97.10^{-4}$	385	122,5
	7	138,85	15,4	$0{,}96.10^{-4}$	385	122,5
	8	153,24	18,1	$0{,}95.10^{-4}$	385	122,5
	9	167,63	21,2	$0{,}94.10^{-4}$	385	122,5
	10	182,01	24,3	$0{,}94.10^{-4}$	385	122,5
	11	196,40	23,2	$0{,}94.10^{-4}$	385	122,5
	12	225,18	17,	$1{,}3.10^{-4}$	385	122,5
	13	75,54	2,1	$0{,}92.10^{-4}$	385	122,5
	14	75,54	2	$0{,}9.10^{-4}$	385	122,5
	15	75,54	2	$0{,}84.10^{-4}$	385	122,5
	16	75,54	2	$1{,}8.10^{-4}$	385	122,5
	17	81,30	3,5	$0{,}91.10^{-4}$	385	122,5
	18	95,68	6,4	$0{,}91.10^{-4}$	385	122,5

Nom	N° Spectre	T (K)	ΔT (K)	P (bar)	$D_{mesurée}$ (μm)	ΔD (μm)
	19	110,07	9,4	$0{,}90.10^{-4}$	385	122,5
	20	110,07	9,9	$1{,}8.10^{-4}$	385	122,5
	21	124,46	12,2	$0{,}90.10^{-4}$	385	122,5
	22	138,85	15,4	$0{,}89.10^{-4}$	385	122,5
	23	153,24	18,5	$0{,}89.10^{-4}$	385	122,5
	24	153,24	18,8	$1{,}8.10^{-4}$	385	122,5
	25	167,63	21,3	$0{,}88.10^{-4}$	385	122,5
	26	182,01	24,3	$0{,}88.10^{-4}$	385	122,5
	27	196,40	22,8	$0{,}88.10^{-4}$	385	122,5
	28	225,18	17,3	$0{,}9.10^{-4}$	385	122,5
	29	75,54	2	$0{,}92.10^{-4}$	385	122,5
19022010	1	75,54	2,1	$1{,}4.10^{-4}$	272	92
	2	81,30	3,2	1.10^{-4}	272	92
	3	95,68	6,9	1.10^{-4}	272	92
	4	110,07	9,3	1.10^{-4}	272	92
	5	124,46	12,3	1.10^{-4}	272	92
	6	138,85	15,2	1.10^{-4}	272	92
	7	153,24	18,2	1.10^{-4}	272	92
	8	153,24	18,3	1.10^{-4}	272	92
	9	167,63	21,4	1.10^{-4}	272	92
	10	182,01	24,2	1.10^{-4}	272	92
	11	196,40	22,8	1.10^{-4}	272	92

Nom	N° Spectre	T (K)	ΔT (K)	P (bar)	$D_{mesurée}$ (μm)	ΔD (μm)
	12	225,18	16,6	1.10^{-4}	272	92
	13	75,54	2,1	1.10^{-4}	272	92
	14	75,54	2	1.10^{-4}	272	92
	15	81,30	3,8	1.10^{-4}	272	92
	16	95,68	6,4	1.10^{-4}	272	92
	17	110,07	9,3	1.10^{-4}	272	92
	18	124,46	12,2	1.10^{-4}	272	92
	19	138,85	15,2	1.10^{-4}	272	92
	20	153,24	18,4	1.10^{-4}	272	92
	21	167,63	21,2	1.10^{-4}	272	92
	22	182,01	24,1	1.10^{-4}	272	92
	23	196,40	22,6	1.10^{-4}	272	92
	24	225,18	16,6	1.10^{-4}	272	92
	25	75,54	2	1.10^{-4}	272	92
	26	75,54	2	1.10^{-4}	272	92
	27	81,30	3,2	1.10^{-4}	272	92
	28	95,68	6,5	1.10^{-4}	272	92
	29	110,07	9,4	1.10^{-4}	272	92
	30	124,46	12,3	1.10^{-4}	272	92
	31	138,85	15,2	1.10^{-4}	272	92
	32	153,24	18,2	1.10^{-4}	272	92
	33	167,63	21,2	1.10^{-4}	272	92

Nom	N° Spectre	T (K)	ΔT (K)	P (bar)	$D_{mesurée}$ (μm)	ΔD (μm)
23022010	1	75,54	2	1.10^{-4}	78	29
	2	81,30	3,6	1.10^{-4}	78	29
	3	95,68	6,5	1.10^{-4}	78	29
	4	110,07	9,5	1.10^{-4}	78	29
	5	124,46	12,4	1.10^{-4}	78	29
	6	138,85	15,2	1.10^{-4}	78	29
	7	153,24	18,2	1.10^{-4}	78	29
	8	167,63	21,1	1.10^{-4}	78	29
	9	182,01	24,1	1.10^{-4}	78	29
	10	196,40	22,7	1.10^{-4}	78	29
	11	225,18	16,7	1.10^{-4}	78	29
	12	75,54	1,9	1.10^{-4}	78	29
	13	75,54	2	1.10^{-4}	78	29
	14	81,30	3,7	1.10^{-4}	78	29
	15	95,68	6,5	1.10^{-4}	78	29
	16	110,07	9,4	1.10^{-4}	78	29
	17	124,46	12,2	1.10^{-4}	78	29
	18	138,85	15,4	1.10^{-4}	78	29
	19	153,24	18,2	1.10^{-4}	78	29
	20	167,63	21,5	1.10^{-4}	78	29
	21	182,01	24,2	1.10^{-4}	78	29
	22	196,40	22,6	1.10^{-4}	78	29

Nom	N° Spectre	T (K)	ΔT (K)	P (bar)	$D_{mesurée}$ (μm)	ΔD (μm)
	23	225,18	16,7	1.10^{-4}	78	29
	24	75,54	1,9	1.10^{-4}	78	29
24022010	1	78,42	2,6	3.10^{-4}	638	185
	2	78,42	2,6	3.10^{-4}	638	185
	3	110,07	9,3	3.10^{-4}	638	185
	4	153,24	18,2	3.10^{-4}	638	185
	5	182,01	24,2	3.10^{-4}	638	185
	6	225,18	16,6	3.10^{-4}	638	185
	7	75,54	1,9	$0,99.10^{-4}$	638	185
	8	81,30	3,7	1.10^{-4}	638	185
	9	95,68	6,4	1.10^{-4}	638	185
	10	110,07	9,3	1.10^{-4}	638	185
	11	124,46	12,3	1.10^{-4}	638	185
	12	138,85	15,3	1.10^{-4}	638	185
	13	153,24	18,2	1.10^{-4}	638	185
	14	167,63	21,2	1.10^{-4}	638	185
	15	182,01	24,2	1.10^{-4}	638	185
	16	196,40	22,6	1.10^{-4}	638	185
	17	225,18	16,6	1.10^{-4}	638	185
	18	75,54	2	1.10^{-4}	638	185
	19	75,54	2	$1,4.10^{-4}$	638	185
	20	81,30	3,8	$1,4.10^{-4}$	638	185

Nom	N° Spectre	T (K)	ΔT (K)	P (bar)	$D_{mesurée}$ (μm)	ΔD (μm)
	21	95,68	6,4	$1,4.10^{-4}$	638	185
	22	110,07	9,2	$1,4.10^{-4}$	638	185
	23	124,46	12,1	$1,4.10^{-4}$	638	185
	24	138,85	15,3	$1,4.10^{-4}$	638	185
	25	153,24	18,2	$1,4.10^{-4}$	638	185
	26	137,63	21,2	$1,4.10^{-4}$	638	185
	27	182,01	24,2	$1,4.10^{-4}$	638	185
	28	196,40	22,7	$1,4.10^{-4}$	638	185
	29	225,18	16,6	$1,5.10^{-4}$	638	185
26022010	1	76,98	2,2	$1,7.10^{-4}$	211	68
	2	81,30	3,5	$1,65.10^{-4}$	211	68
	3	95,68	6,6	$1,6.10^{-4}$	211	68
	4	110,07	9,3	$1,6.10^{-4}$	211	68
	5	124,46	12,2	$1,6.10^{-4}$	211	68
	6	138,85	15,4	$1,6.10^{-4}$	211	68
	7	153,24	18,2	$1,6.10^{-4}$	211	68
	8	167,63	21,4	$1,6.10^{-4}$	211	68
	9	182,01	24,2	$1,6.10^{-4}$	211	68
	10	196,40	22,7	$1,6.10^{-4}$	211	68
	11	225,18	16,6	$1,6.10^{-4}$	211	68
	12	76,98	2,3	$1,55.10^{-4}$	211	68
	13	76,98	2,3	$1,9.10^{-4}$	211	68

Nom	N° Spectre	T (K)	ΔT (K)	P (bar)	$D_{mesurée}$ (μm)	ΔD (μm)
	14	81,30	3,7	$1{,}9.10^{-4}$	211	68
	15	81,30	3,7	$2{,}4.10^{-4}$	211	68
	16	81,30	3,6	$2{,}9.10^{-4}$	211	68
	17	81,30	4	$1{,}9.10^{-4}$	211	68
	18	95,68	6,7	$1{,}9.10^{-4}$	211	68
	19	110,07	9,4	$1{,}9.10^{-4}$	211	68
	20	124,46	12,2	$1{,}9.10^{-4}$	211	68
	21	138,85	15,3	$1{,}9.10^{-4}$	211	68
	22	153,24	18,2	$1{,}9.10^{-4}$	211	68
	23	167,63	21,2	$1{,}9.10^{-4}$	211	68
	24	182,01	24,1	$1{,}9.10^{-4}$	211	68
	25	196,40	22,7	$1{,}9.10^{-4}$	211	68
	26	225,18	16,6	$1{,}9.10^{-4}$	211	68
12042010	1	77,6	0,2	$2{,}6.10^{-5}$	795	213
	2	80	0,5	$2{,}5.10^{-5}$	795	213
	3	80	0,3	$2{,}4.10^{-5}$	795	213
	4	90	0,4	$2{,}4.10^{-5}$	795	213
	5	100	0,5	$2{,}4.10^{-5}$	795	213
	6	110	0,5	$2{,}4.10^{-5}$	795	213
	7	120	0,4	$2{,}4.10^{-5}$	795	213
	8	130	0,4	$2{,}3.10^{-5}$	795	213
	9	140	0,2	$2{,}3.10^{-5}$	795	213

Nom	N° Spectre	T (K)	ΔT (K)	P (bar)	$D_{mesurée}$ (μm)	ΔD (μm)
	10	150	0,2	$2{,}2.10^{-5}$	795	213
	11	160	0,1	$2{,}2.10^{-5}$	795	213
	12	170	0,1	$2{,}1.10^{-5}$	795	213
	13	170	0,1	$2{,}1.10^{-5}$	795	213
	14	77	0,5	$2{,}1.10^{-5}$	795	213
	15	77,7	0,2	$2{,}1.10^{-5}$	795	213
	16	77,7	0,2	$2{,}1.10^{-5}$	795	213
	17	80	0,5	$1{,}8.10^{-5}$	795	213
	18	90	0,5	$1{,}9.10^{-5}$	795	213
	19	100	0,3	$1{,}9.10^{-5}$	795	213
	20	110	0,3	$1{,}9.10^{-5}$	795	213
	21	120	0,6	$1{,}9.10^{-5}$	795	213
	22	130	0,4	$1{,}9.10^{-5}$	795	213
	23	140	0,3	$1{,}9.10^{-5}$	795	213
	24	140	0,3	$1{,}9.10^{-5}$	795	213
	25	150	0,3	$1{,}9.10^{-5}$	795	213
	26	160	0,2	$1{,}9.10^{-5}$	795	213
	27	170	0,2	$1{,}9.10^{-5}$	795	213
	28	170	0,2	$1{,}9.10^{-5}$	795	213
	29	180	0,3	$1{,}9.10^{-5}$	795	213
	30	180	0,3	$1{,}9.10^{-5}$	795	213
	31	77,5	0,2	$1{,}9.10^{-5}$	795	213

Nom	N° Spectre	T (K)	ΔT (K)	P (bar)	$D_{mesurée}$ (μm)	ΔD (μm)
14042010	1	77,8	0,2	$2{,}8.10^{-5}$	638	185
	2	80	0,8	$2{,}7.10^{-5}$	638	185
	3	90	0,6	$2{,}7.10^{-5}$	638	185
	4	100	0,5	$2{,}7.10^{-5}$	638	185
	5	110	0,6	$2{,}6.10^{-5}$	638	185
	6	120	0,5	$2{,}6.10^{-5}$	638	185
	7	130	0,5	$2{,}6.10^{-5}$	638	185
	8	140	0,6	$2{,}6.10^{-5}$	638	185
	9	150	0,4	$2{,}6.10^{-5}$	638	185
	10	160	0,2	$2{,}5.10^{-5}$	638	185
	11	160	0,2	$2{,}5.10^{-5}$	638	185
	12	170	0,2	$2{,}5.10^{-5}$	638	185
	13	180	0,2	$2{,}4.10^{-5}$	638	185
	14	77	0,3	$2{,}3.10^{-5}$	638	185
	15	76,6	0,1	$2{,}2.10^{-5}$	638	185
	16	80	0,6	$2{,}2.10^{-5}$	638	185
	17	90	0,7	$2{,}3.10^{-5}$	638	185
	18	100	0,7	$2{,}3.10^{-5}$	638	185
	19	110	0,5	$2{,}2.10^{-5}$	638	185
	20	120	0,7	$2{,}2.10^{-5}$	638	185
	21	130	0,5	$2{,}2.10^{-5}$	638	185
	22	140	0,4	$2{,}3.10^{-5}$	638	185

Nom	N° Spectre	T (K)	ΔT (K)	P (bar)	$D_{mesurée}$ (μm)	ΔD (μm)
	23	150	0,3	$2{,}3.10^{-5}$	638	185
	24	160	0,3	$2{,}3.10^{-5}$	638	185
	25	170	0,2	$2{,}3.10^{-5}$	638	185
	26	170	0,2	$2{,}4.10^{-5}$	638	185
	27	180	0,2	$2{,}4.10^{-5}$	638	185
	28	180	0,2	$2{,}4.10^{-5}$	638	185
	29	190	0,4	$2{,}6.10^{-5}$	638	185
	30	190	0,2	$2{,}5.10^{-5}$	638	185
	31	77,2	0,2	$2{,}3.10^{-5}$	638	185

Liste des spectres de dioxyde de carbone gazeux dans le cryostat à azote liquide (voir section IV.1).

Nom	N° Spectre	T (K)	$P_{cellule}$ (bar)
06012009	3	290	-
	4	290	-
	5	290	-
	6	290	-
	7	290	-
	8	290	1

Liste des spectres de dioxyde de carbone solide à l'échelle microscopique dans le cryostat à azote liquide (voir section IV.1). Dans cette expérience, la pression de dioxyde de carbone est la pression de saturation à la température T.

Nom	N° Spectre	T (K)	D (μm)	N° Spectre	T (K)	D (μm)
23062010	1	78,8	225	33	90	195
	2	78,7	150	34	90	210
	3	78,7	180	35	90	260
	4	78,7	400	36	90	200
	5	78,7	190	37	90	230
	6	78,9	315	38	90	225
	7	78,9	230	39	95	205
	8	79,0	205	40	95	320
	10	78,9	420	41	95	225
	11	78,8	185	42	95	220
	12	79,2	165	43	96	225
	13	79,2	205	44	99	340
	14	79,2	195	45	100	330
	15	79,1	230	46	100	230
	16	79,3	195	47	100	180
	17	79,5	225	48	100	190
	18	79,5	310	49	105	275
	19	82,8	300	50	105	230
	20	82,2	225	51	105	240
	21	82,5	200	52	110	300

Nom	N° Spectre	T (K)	D (μm)	N° Spectre	T (K)	D (μm)
	22	82,0	325	53	110	355
	23	81,9	350	54	110	215
	24	82,0	245	55	110	295
	25	82,0	170	56	110	195
	26	85	230	57	115	330
	27	84	265	58	115	265
	28	83,8	360	59	115	360
	29	84	235	60	115	205
	30	85	160	61	115	205
	31	85	170	62	115	165
	32	90	220			

Liste des spectres de clathrates de dioxyde de carbone solide à l'échelle macroscopique dans le cryostat à azote liquide (voir section IV.1.3).

Nom	N° Spectre	T (K)	ΔT (K)	P (mbar)	D (μm)	ΔD (μm)
22072010	9	87,4	0,5	34	385	120
	10	86,5	0,2	35	385	120
	11	86,8	0,3	34	385	120
premier	12	87,2	0,3	34	385	120
	13	89,5	1,5	34	385	120
	14	86,7	0,3	35	385	120
chargement	15	87	0,3	34	385	120
	16	87,5	0,5	34	385	120
	17	88,5	0,5	33	385	120
	18	89,5	0,5	34	385	120
	19	90,5	0,5	35	385	120
	20	91,5	0,5	35	385	120
	21	92,5	0,7	34	385	120
	22	93,5	0,7	34	385	120
	23	94,5	0,7	35	385	120
	24	95,5	0,7	34	385	120
	25	96,5	1	35	385	120
	26	97,5	2	35	385	120
	27	98,5	2	35	385	120
	28	99,5	2	35	385	120
	29	100,5	2	35	385	120

Nom	N° Spectre	T (K)	ΔT (K)	P (mbar)	D (μm)	ΔD (μm)
	30	101	2	35	385	120
	31	105	2	35	385	120
	32	107,5	2	35	385	120
	33	110	1	36	385	120
	34	115	1	36	385	120
	35	120	1	36	385	120
	36	125	2	37	385	120
	37	130	2	36	385	120
	38	135	2	36	385	120
	39	140	2,5	36	385	120
	40	145	2	36	385	120
	41	150	2	37	385	120
	42	155	2	37	385	120
	43	160	2	36	385	120
	44	165	3	37	385	120
	45	170	3	37	385	120
	46	175	3	36	385	120
	47	180	3	36	385	120
22072010	51	88	2	19	385	120
	52	90	1	18	385	120
	53	95	1	18	385	120
second	54	100	1	18	385	120

Nom	N° Spectre	T (K)	ΔT (K)	P (mbar)	D (μm)	ΔD (μm)
	55	105	2	19	385	120
	56	110	2	22	385	120
chargement	57	115	1	24	385	120
	58	120	1	27	385	120
	59	125	1	30	385	120
	60	130	1	32	385	120
	61	135	2	33	385	120
	62	140	2	33	385	120
	63	135	1	35	385	120
	64	145	1	36	385	120
	65	150	1	34	385	120
	66	155	0,5	36	385	120
	67	160	0,5	37	385	120
	69	170	0,3	36	385	120
	70	175	0,7	36	385	120
23072010	01	86	1	34	270	90
	02	90	0,5	33	270	90
	03	95	1	32	270	90
	04	100	1	32	270	90
	05	105	1	31	270	90
	06	110	1	31	270	90
	07	115	1	29	270	90

Nom	N° Spectre	T (K)	ΔT (K)	P (mbar)	D (μm)	ΔD (μm)
	08	120	1	29	270	90
	09	125	1	28	270	90
	10	130	1	29	270	90
	11	135	1	29	270	90
	12	140	1	28	270	90
	13	145	1	28	270	90
	14	150	1	28	270	90
	15	155	1	28	270	90
	16	160	1	28	270	90
	17	165	1	28	270	90
	18	170	1	28	270	90
	19	170	0,2	28	270	90
	20	172	0,2	28	270	90
	21	172,5	0,3	29	270	90
	22	172,5	0,3	29	270	90
26072010	01	86	1	100	385	120
	02	90	2	1000	385	120
	03	95	2	50	385	120
premier	04	100	1	63	385	120
	05	105	1	80	385	120
	06	110	1	95	385	120
chargement	07	115	1	85	385	120

Nom	N° Spectre	T (K)	ΔT (K)	P (mbar)	D (μm)	ΔD (μm)
	08	120	1	97	385	120
	09	125	1	95	385	120
	10	130	1	47	385	120
	11	135	1	58	385	120
	12	140	1	72	385	120
	13	145	1	100	385	120
	15	145	1	93	385	120
	16	150	1	90	385	120
	17	150	1	90	385	120
	18	150	1	90	385	120
	19	155	1	90	385	120
	20	155	1	93	385	120
	21	155	1	90	385	120
	22	155	1	90	385	120
26072010	23	86	1	62	385	120
	24	90	2	85	385	120
	25	95	1	66	385	120
second	26	100	1	68	385	120
	27	105	1	50	385	120
	28	110	1	55	385	120
chargement	29	115	1	75	385	120
	30	120	1	65	385	120

Nom	N° Spectre	T (K)	ΔT (K)	P (mbar)	D (μm)	ΔD (μm)
	31	125	1	70	385	120
	32	130	1	65	385	120
	33	135	1	57	385	120
	34	140	1	60	385	120
	35	145	1	66	385	120
	36	150	1	70	385	120
	37	150	1	75	385	120
	38	155	1	81	385	120
	39	155	1	86	385	120
	40	155	1	90	385	120
	41	160	1	98	385	120
27072010	01	85	1	96	640	185
	02	90	2	42	640	185
	03	95	1	63	640	185
	04	100	1	87	640	185
	05	105	1	90	640	185
	06	110	1	90	640	185
	07	115	1	67	640	185
	08	120	1	65	640	185
	09	125	1	68	640	185
	10	130	1	73	640	185
	11	135	1	80	640	185

Nom	N° Spectre	T (K)	ΔT (K)	P (mbar)	D (μm)	ΔD (μm)
	12	140	1	95	640	185
	13	145	1	50	640	185
	14	145	1	70	640	185
	15	150	1	88	640	185
	16	150	1	90	640	185
	17	155	1	65	640	185
	18	155	1	78	640	185
	19	155	1	88	640	185
	20	160	1	90	640	185
	21	160	1	91	640	185
	22	165	1	90	640	185
29072010	01	85	2	62	640	185
	02	90	2	68	640	185
	03	95	1	80	640	185
	04	100	2	90	640	185
	05	105	1	66	640	185
	06	110	1	50	640	185
	07	115	1	55	640	185
	08	120	1	65	640	185
	09	125	1	75	640	185
	10	130	1	92	640	185
	11	135	0,5	95	640	185

Nom	N° Spectre	T (K)	ΔT (K)	P (mbar)	D (μm)	ΔD (μm)
	12	140	0,5	65	640	185
	13	145	1	80	640	185
	14	150	1	90	640	185
	15	155	1	90	640	185
	16	160	1	95	640	185
	17	165	1	95	640	185
30072010	01	85	1	80	185	65
	02	90	1	90	185	65
	03	95	1	90	185	65
premier	04	100	1	90	185	65
	05	105	1	90	185	65
	06	110	1	90	185	65
chargement	07	115	1	90	185	65
	08	120	1	90	185	65
	09	125	1	90	185	65
	10	130	1	86	185	65
	11	135	1	83	185	65
	12	140	1	83	185	65
	13	145	1	85	185	65
	14	150	1	85	185	65
	15	155	1	88	185	65
	16	160	1	85	185	65

Nom	N° Spectre	T (K)	ΔT (K)	P (mbar)	D (μm)	ΔD (μm)
	17	165	1	85	185	65
30072010	18	86	1	45	185	65
	19	90	1	40	185	65
	20	95	1	40	185	65
second	21	100	1	40	185	65
	22	105	1	40	185	65
	23	110	1	38	185	65
chargement	24	115	1	38	185	65
	25	120	1	39	185	65
	26	125	1	38	185	65
	27	130	1	38	185	65
	28	135	1	37	185	65
	29	140	1	38	185	65
	30	145	1	38	185	65
	31	150	1	38	185	65
	32	150	1	38	185	65

Liste des spectres de clathrates de dioxyde de carbone solide à l'échelle microscopique dans le cryostat à azote liquide (voir section IV.1.3). Le ΔT est autour de 1 K.

Nom	N° Spectre	T (K)	D (μm)
26072010	42	107,2	308
	43	100	348
	46	115	308
	47	115	348
	48	115	218
	49	115	199
27072010	25	117,5	171
	26	119,3	138
	27	125	199
	28	150	164
	29	150	164
	30	150	171
	31	150	138
	32	150	199
	33	180	162
	34	180	171
	35	180	138
	36	180	199
	37	180	164
	38	250	164
	39	250	171

Nom	N° Spectre	T (K)	D (μm)
29072010	18	200	123
	20	200	123
	21	200	134
	22	200	182
	23	200	175
	24	230	175
	25	230	123
	26	230	134
	27	230	182
30072010	33	200	133
	34	200	206
	35	200	279
	36	200	163
	37	210	163
	38	210	133
	39	210	206
	40	210	279
	41	230	279
	42	230	163
	43	230	133
	44	230	175

Nom	N° Spectre	T (K)	D (μm)	Nom	N° Spectre	T (K)	D (μm)
	40	250	138		45	230	186
	41	250	199		46	230	119
	42	270	199		47	240	119
	43	270	164		48	240	133
	44	270	171		49	240	175
	45	270	138		50	240	186
	46	273	138		51	260	186
	47	273	199		52	260	133
	48	273	164		53	260	175
	49	273	171		54	270	175
	50	274,4	171		55	270	186
	51	275,6	171		56	270	133
28072010	01	118	159		57	273	133
	02	119	168		58	273	186
	03	118,7	161		59	274	186
	04	119	200		60	274	133
	05	140	159		61	275	133
	06	140	168		62	275	186
	07	140	161		63	276	186
	08	140	200		64	276	133
	09	170	200		65	277	133
	10	170	159		66	277	186

Nom	N° Spectre	T (K)	D (μm)	Nom	N° Spectre	T (K)	D (μm)
	11	170	168		67	278	186
	12	170	161				
	13	190	161				
	14	190	200				
	15	190	159				
	16	190	168				
	17	220	168				
	18	220	161				
	19	220	200				
	20	220	159				

Liste des spectres de mélange de glaces d'eau et de dioxyde de carbone à l'échelle microscopique dans le cryostat à azote liquide (voir section IV.1.3). Le ΔT est autour de 1 K.

Nom	N° Spectre	T (K)	ΔT (K)	D_{H_2O} (μm)	D_{CO_2} (μm)
15092010	05	135	2	103	77
	07	133	2	103	77
	08	133	2	133	51
	09	133	2	113	40
	10	147	2	120	70
	11	127	2	80	54
	12	125	2	105	50
	13	126	2	64	75
	14	180	2	102	55
	24	130	2	180	-
	25	130	2	78	70
	26	130	2	-	-

Annexe B

Les paramètres

Liste des paramètres sur les échantillons microscopiques de glace d'eau.

Référence des spectres	Température T (K)	Incertitude sur T (K)	Taille de grains D (μm)	Incertitude sur D (μm)
20081119/Spectre 2	90,0000	1,00000	300,000	2,00000
20081119/Spectre 3	90,0000	1,00000	55,0000	2,00000
20081120/Spectre 1	90,0000	1,00000	140,000	2,00000
20081120/Spectre 2	90,0000	1,00000	100,000	2,00000
20081120/Spectre 3	90,0000	1,00000	150,000	2,00000
20081120/Spectre 4	90,0000	1,00000	210,000	2,00000
20081120/Spectre 5	90,0000	1,00000	105,000	2,00000
20081120/Spectre 6	90,0000	1,00000	130,000	2,00000
20081121/Spectre 1	180,000	1,00000	50,0000	2,00000
20081121/Spectre 2	170,000	1,00000	50,0000	2,00000
20081121/Spectre 3	160,000	1,00000	50,0000	2,00000
20081121/Spectre 4	150,000	1,00000	50,0000	2,00000

Position des bandes				Aire des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
1,50122	1,56180	1,65250	1,64028	-0,608090	-0,517220	-0,219600	-0,253540
1,50437	1,56156	1,65230	1,63640	-0,177160	-0,137560	-0,0575500	-0,0592300
1,50161	1,55947	1,65194	1,63644	-0,406370	-0,334150	-0,135850	-0,155580
1,50147	1,56024	1,65219	1,63900	-0,424550	-0,363530	-0,151540	-0,160430
1,50145	1,56047	1,65235	1,63836	-0,477760	-0,403470	-0,172850	-0,185340
1,50209	1,55984	1,65234	1,63757	-0,336670	-0,281890	-0,119040	-0,122900
1,50219	1,55950	1,65221	1,63906	-0,246100	-0,214570	-0,0889300	-0,0872600
1,50176	1,55948	1,65229	1,64014	-0,328480	-0,291130	-0,122680	-0,118010
1,49245	1,54377	1,64296	1,63231	-0,100830	-0,0934700	-0,0103500	-0,0458700
1,49305	1,54484	1,64298	1,63694	-0,0956100	-0,0957200	-0,0119000	-0,0424100
1,49392	1,54632	1,64519	1,64006	-0,0951600	-0,101000	-0,0125300	-0,0410100
1,49736	1,55214	1,64532	1,63426	-0,135800	-0,105030	-0,0192300	-0,0525800

Profondeur des bandes				Largeur des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
-0,0399400	-0,0360100	-0,00642000	-0,0263500	0,0617000	0,0654100	0,0274500	0,0976500
-0,0109700	-0,00843000	-0,00149000	-0,00606000	0,0581900	0,0575900	0,0243800	0,0961900
-0,0250800	-0,0226200	-0,00391000	-0,0178100	0,0579800	0,0635900	0,0270300	0,107530
-0,0261800	-0,0250100	-0,00433000	-0,0169700	0,0579400	0,0646300	0,0268700	0,0993600
-0,0300100	-0,0277100	-0,00501000	-0,0201300	0,0590100	0,0645200	0,0272200	0,102030
-0,0202800	-0,0189700	-0,00337000	-0,0136500	0,0566000	0,0632100	0,0265600	0,104350
-0,0144000	-0,0145600	-0,00245000	-0,00910000	0,0549600	0,0637300	0,0258700	0,0979500
-0,0193400	-0,0202300	-0,00343000	-0,0123800	0,0553000	0,0652900	0,0262400	0,0985200
-0,00581000	-0,00759000	-0,000340612	-0,00655000	0,0541300	0,0762500	0,0309200	0,134110
-0,00539000	-0,00797000	-0,000415810	-0,00548000	0,0529400	0,0781900	0,0328400	0,121390
-0,00517000	-0,00850000	-0,000386076	-0,00446000	0,0510800	0,0790100	0,0289500	0,102050
-0,00830000	-0,00751000	-0,000565172	-0,00705000	0,0574400	0,0671300	0,0276100	0,125870

Référence des spectres	Température T (K)	Incertitude sur T (K)	Taille de grains D (μm)	Incertitude sur D (μm)
20081121/Spectre 5	140,000	1,00000	50,0000	2,00000
20081121/Spectre 6	130,000	1,00000	50,0000	2,00000
20081121/Spectre 7	120,000	1,00000	50,0000	2,00000
20081121/Spectre 8	110,000	1,00000	50,0000	2,00000
20081121/Spectre 9	100,000	1,00000	50,0000	2,00000
20081121/Spectre 10	90,0000	1,00000	50,0000	2,00000
20081121/Spectre 11	80,0000	1,00000	50,0000	2,00000
20081121/Spectre 12	180,000	1,00000	200,000	2,00000
20081121/Spectre 13	170,000	1,00000	200,000	2,00000
20081121/Spectre 14	160,000	1,00000	200,000	2,00000
20081121/Spectre 15	150,000	1,00000	200,000	2,00000
20081121/Spectre 16	140,000	1,00000	200,000	2,00000

Position des bandes				Aire des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
1,49851	1,55323	1,64721	1,63226	-0,123300	-0,0936900	-0,0223600	-0,0481700
1,49871	1,55389	1,64788	1,64109	-0,129200	-0,114960	-0,0286200	-0,0481400
1,50028	1,55607	1,64938	1,63810	-0,134180	-0,110810	-0,0307200	-0,0510600
1,50103	1,55743	1,65035	1,64060	-0,135940	-0,116710	-0,0360100	-0,0510200
1,50202	1,55899	1,65136	1,64145	-0,135310	-0,116650	-0,0401600	-0,0500900
1,50344	1,56105	1,65206	1,64238	-0,155760	-0,131230	-0,0489200	-0,0554900
1,50453	1,56294	1,65304	1,64369	-0,158200	-0,133850	-0,0561200	-0,0566700
1,49038	1,54481	1,64289	1,62911	-0,396050	-0,351760	-0,0480400	-0,188150
1,49188	1,54715	1,64415	1,62967	-0,418670	-0,355630	-0,0561700	-0,193630
1,49326	1,54925	1,64531	1,63088	-0,437150	-0,363450	-0,0669600	-0,196420
1,49472	1,55141	1,64631	1,63146	-0,456650	-0,366230	-0,0771600	-0,201940
1,49595	1,55304	1,64737	1,63271	-0,464650	-0,373050	-0,0908200	-0,199870

Profondeur des bandes				Largeur des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
-0,00743000	-0,00641000	-0,000664261	-0,00674000	0,0565800	0,0642500	0,0279100	0,131510
-0,00741000	-0,00844000	-0,000822738	-0,00546000	0,0538600	0,0689400	0,0270000	0,106530
-0,00797000	-0,00760000	-0,000861480	-0,00585000	0,0557700	0,0644300	0,0263400	0,107660
-0,00796000	-0,00807000	-0,000985888	-0,00539000	0,0550100	0,0649400	0,0257200	0,0992800
-0,00794000	-0,00793000	-0,00107000	-0,00497000	0,0551100	0,0638700	0,0250400	0,0932900
-0,00936000	-0,00853000	-0,00123000	-0,00517000	0,0564300	0,0610400	0,0236200	0,0876000
-0,00961000	-0,00858000	-0,00137000	-0,00493000	0,0570900	0,0602000	0,0229900	0,0817200
-0,0247000	-0,0296500	-0,00172000	-0,0286200	0,0586000	0,0791800	0,0336500	0,142880
-0,0262200	-0,0288700	-0,00194000	-0,0287200	0,0588400	0,0762600	0,0323900	0,139320
-0,0274500	-0,0286900	-0,00226000	-0,0282100	0,0590000	0,0741700	0,0317400	0,134940
-0,0289500	-0,0279200	-0,00252000	-0,0283900	0,0595600	0,0716200	0,0307100	0,132060
-0,0293800	-0,0278900	-0,00292000	-0,0271600	0,0594000	0,0702300	0,0302000	0,127670

Référence des spectres	Température T (K)	Incertitude sur T (K)	Taille de grains D (μm)	Incertitude sur D (μm)
20081121/Spectre 17	130,000	1,00000	200,000	2,00000
20081121/Spectre 18	120,000	1,00000	200,000	2,00000
20081121/Spectre 19	110,000	1,00000	200,000	2,00000
20081121/Spectre 20	100,000	1,00000	200,000	2,00000
20081121/Spectre 21	90,0000	1,00000	200,000	2,00000
20081121/Spectre 22	80,0000	1,00000	200,000	2,00000
20090311/Spectre 1	180,000	1,00000	110,000	2,00000
20090311/Spectre 2	160,000	1,00000	110,000	2,00000
20090311/Spectre 3	140,000	1,00000	110,000	2,00000
20090311/Spectre 4	120,000	1,00000	110,000	2,00000
20090311/Spectre 5	100,000	1,00000	110,000	2,00000
20090316/Spectre 1	180,000	1,00000	80,0000	2,00000

Position des bandes				Aire des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
1,49734	1,55508	1,64861	1,63402	-0,479560	-0,382720	-0,106830	-0,200580
1,49863	1,55685	1,64969	1,63481	-0,495460	-0,392540	-0,124230	-0,204000
1,49980	1,55845	1,65068	1,63588	-0,502910	-0,401360	-0,142450	-0,201190
1,50073	1,55998	1,65172	1,63810	-0,510460	-0,422590	-0,165540	-0,199640
1,50146	1,56124	1,65248	1,63969	-0,516160	-0,437470	-0,182330	-0,199530
1,50243	1,56306	1,65358	1,64202	-0,524470	-0,458360	-0,205260	-0,203630
1,49378	1,54768	1,64348	1,61789	-0,297660	-0,199790	-0,0251000	-0,131820
1,49688	1,55227	1,64597	1,62382	-0,324490	-0,217150	-0,0398400	-0,135780
1,49859	1,55468	1,64760	1,63022	-0,336340	-0,244480	-0,0578000	-0,133540
1,50009	1,55687	1,64947	1,63558	-0,337630	-0,268170	-0,0798100	-0,127240
1,50253	1,56044	1,65143	1,63713	-0,366310	-0,288210	-0,109180	-0,135600
1,49758	1,55436	1,64411	1,60000	-0,197600	-0,0933700	-0,0174600	-0,0975100

Profondeur des bandes				Largeur des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
-0,0304700	-0,0279200	-0,00337000	-0,0261300	0,0596900	0,0685400	0,0296400	0,122370
-0,0317000	-0,0279200	-0,00383000	-0,0256600	0,0601000	0,0668300	0,0289900	0,118180
-0,0322300	-0,0280100	-0,00431000	-0,0240900	0,0602100	0,0655600	0,0284200	0,112510
-0,0325500	-0,0293100	-0,00487000	-0,0219900	0,0599100	0,0651500	0,0276300	0,103500
-0,0328800	-0,0301400	-0,00524000	-0,0204300	0,0598500	0,0647200	0,0269800	0,0961800
-0,0334200	-0,0314000	-0,00568000	-0,0187100	0,0598700	0,0643600	0,0259900	0,0863100
-0,0187400	-0,0142600	-0,000796193	-0,0213800	0,0591300	0,0670400	0,0298000	0,152340
-0,0207000	-0,0148000	-0,00123000	-0,0202800	0,0599200	0,0640300	0,0291100	0,140290
-0,0211800	-0,0167100	-0,00175000	-0,0179500	0,0591500	0,0642300	0,0284000	0,126290
-0,0207500	-0,0183900	-0,00232000	-0,0150900	0,0577300	0,0644100	0,0273000	0,111440
-0,0231000	-0,0187600	-0,00302000	-0,0147800	0,0592400	0,0611500	0,0260000	0,102390
-0,0136700	-0,00567000	-0,000638575	-0,0191900	0,0649900	0,0570900	0,0343600	0,184830

Référence des spectres	Température T (K)	Incertitude sur T (K)	Taille de grains D (μm)	Incertitude sur D (μm)
20090316/Spectre 2	180,000	1,00000	70,0000	2,00000
20090316/Spectre 3	170,000	1,00000	80,0000	2,00000
20090316/Spectre 4	170,000	1,00000	70,0000	2,00000
20090316/Spectre 5	160,000	1,00000	80,0000	2,00000
20090316/Spectre 6	160,000	1,00000	70,0000	2,00000
20090316/Spectre 7	150,000	1,00000	80,0000	2,00000
20090316/Spectre 8	150,000	1,00000	70,0000	2,00000
20090316/Spectre 9	140,000	1,00000	80,0000	2,00000
20090316/Spectre 10	140,000	1,00000	70,0000	2,00000
20090316/Spectre 11	130,000	1,00000	80,0000	2,00000
20090316/Spectre 12	130,000	1,00000	70,0000	2,00000
20090316/Spectre 13	120,000	1,00000	80,0000	2,00000

Position des bandes				Aire des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
1,49923	1,55779	1,64324	1,60000	-0,181170	-0,0795000	-0,0170800	-0,0784300
1,49861	1,55528	1,64550	1,60000	-0,198560	-0,0956600	-0,0229300	-0,101560
1,50012	1,55922	1,64346	1,60000	-0,183390	-0,0870700	-0,0247700	-0,0758300
1,49958	1,55677	1,64626	1,60000	-0,200670	-0,0990700	-0,0287100	-0,100110
1,50095	1,56075	1,64425	1,60000	-0,183100	-0,0906900	-0,0318300	-0,0738700
1,49985	1,55684	1,64712	1,60000	-0,196100	-0,103270	-0,0348500	-0,0989600
1,50193	1,56089	1,64646	1,60000	-0,187520	-0,0887300	-0,0331700	-0,0803200
1,50123	1,55878	1,64793	1,60000	-0,189100	-0,0999800	-0,0396300	-0,0877600
1,50227	1,56071	1,64812	1,60000	-0,190390	-0,0929700	-0,0386100	-0,0863500
1,50161	1,55904	1,64895	1,60000	-0,205470	-0,111810	-0,0498600	-0,0987400
1,50358	1,56275	1,64862	1,60000	-0,191050	-0,0929500	-0,0449500	-0,0832800
1,50295	1,56155	1,64937	1,60000	-0,202970	-0,110440	-0,0580000	-0,0900400

Profondeur des bandes				Largeur des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
-0,0133000	-0,00474000	-0,000699637	-0,0152000	0,0689500	0,0560000	0,0384800	0,182040
-0,0135500	-0,00569000	-0,000774978	-0,0200900	0,0641000	0,0558500	0,0317500	0,185810
-0,0133400	-0,00530000	-0,00113000	-0,0153200	0,0683200	0,0572300	0,0429000	0,189780
-0,0137000	-0,00588000	-0,000997772	-0,0198600	0,0641500	0,0557500	0,0326500	0,186390
-0,0133500	-0,00556000	-0,00146000	-0,0152700	0,0685000	0,0576300	0,0432200	0,194250
-0,0130300	-0,00620000	-0,00123000	-0,0198300	0,0624000	0,0563900	0,0332800	0,188270
-0,0136200	-0,00511000	-0,00123000	-0,0156800	0,0682500	0,0541300	0,0348900	0,183380
-0,0127200	-0,00586000	-0,00138000	-0,0173900	0,0632100	0,0550900	0,0327900	0,186080
-0,0135400	-0,00524000	-0,00130000	-0,0167400	0,0668000	0,0529700	0,0316500	0,182070
-0,0135600	-0,00652000	-0,00168000	-0,0191300	0,0620100	0,0547700	0,0316600	0,182030
-0,0138900	-0,00510000	-0,00156000	-0,0158000	0,0683200	0,0515900	0,0325400	0,178260
-0,0138400	-0,00634000	-0,00197000	-0,0178200	0,0640700	0,0539600	0,0318600	0,185950

Référence des spectres	Température T (K)	Incertitude sur T (K)	Taille de grains D (μm)	Incertitude sur D (μm)
20090316/Spectre 14	120,000	1,00000	70,0000	2,00000
20090316/Spectre 15	110,000	1,00000	80,0000	2,00000
20090316/Spectre 16	110,000	1,00000	70,0000	2,00000
20090316/Spectre 17	100,000	1,00000	80,0000	2,00000
20090316/Spectre 18	100,000	1,00000	70,0000	2,00000
20090316/Spectre 19	90,0000	1,00000	80,0000	2,00000
20090316/Spectre 20	90,0000	1,00000	70,0000	2,00000
20090316/Spectre 21	80,0000	1,00000	80,0000	2,00000
20090316/Spectre 22	80,0000	1,00000	70,0000	2,00000

Position des bandes				Aire des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
1,49955	1,55540	1,64880	1,62539	-0,201320	-0,136670	-0,0495900	-0,0802900
1,50352	1,56179	1,65038	1,60000	-0,216370	-0,119300	-0,0694900	-0,0958200
1,50825	1,56687	1,65099	1,62651	-0,234560	-0,106000	-0,0540400	-0,0912300

Position des bandes				Aire des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
1,50469	1,56328	1,65127	1,60000	-0,220820	-0,120060	-0,0792400	-0,0954800
1,50891	1,56729	1,65172	1,62971	-0,236480	-0,119610	-0,0619800	-0,0852200
1,50466	1,56308	1,65207	1,60000	-0,212310	-0,121370	-0,0869600	-0,0933300
1,50926	1,56780	1,65259	1,62844	-0,233360	-0,120430	-0,0713600	-0,0845600
1,50562	1,56459	1,65270	1,60000	-0,223080	-0,129170	-0,103970	-0,0946900
1,51000	1,56905	1,65339	1,62906	-0,239960	-0,123660	-0,0831800	-0,0866600

Profondeur des bandes				Largeur des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
-0,0138800	-0,00942000	-0,00144000	-0,0116000	0,0647600	0,0647200	0,0273400	0,135740
-0,0145000	-0,00668000	-0,00221000	-0,0180400	0,0629400	0,0525800	0,0299200	0,176830
-0,0191600	-0,00527000	-0,00139000	-0,0122100	0,0767200	0,0466700	0,0242100	0,125720
-0,0151000	-0,00648000	-0,00245000	-0,0174100	0,0642400	0,0507100	0,0289900	0,171320
-0,0189300	-0,00608000	-0,00158000	-0,0101600	0,0752100	0,0477300	0,0239100	0,111950
-0,0140300	-0,00661000	-0,00265000	-0,0170600	0,0620800	0,0511700	0,0285900	0,171740

Profondeur des bandes				Largeur des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
-0,0186800	-0,00608000	-0,00182000	-0,00993000	0,0751900	0,0474100	0,0239800	0,110350
-0,0150100	-0,00691000	-0,00310000	-0,0172500	0,0632300	0,0502500	0,0280400	0,171190
-0,0195600	-0,00605000	-0,00212000	-0,00990000	0,0765700	0,0459200	0,0239400	0,107280

Liste des paramètres sur les échantillons macroscopiques de glace d'eau non tamisés.

Référence des spectres	Température T (K)	Incertitude sur T (K)	Taille de grains D (μm)	Incertitude sur D (μm)
20090317/Spectre 5	180,000	1,00000	274,000	30,0000
20090317/Spectre 6	170,000	1,00000	274,000	30,0000
20090317/Spectre 7	160,000	1,00000	274,000	30,0000
20090317/Spectre 8	150,000	1,00000	274,000	30,0000
20090317/Spectre 9	140,000	1,00000	274,000	30,0000
20090317/Spectre 10	130,000	1,00000	274,000	30,0000
20090317/Spectre 11	120,000	1,00000	274,000	30,0000
20090317/Spectre 12	110,000	1,00000	274,000	30,0000
20090317/Spectre 13	100,000	1,00000	274,000	30,0000
20090317/Spectre 14	90,0000	1,00000	274,000	30,0000
20090317/Spectre 15	80,0000	1,00000	274,000	30,0000
20090317/Spectre 19	180,000	1,00000	1023,000	30,0000

Position des bandes				Aire des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
1,47686	1,53828	1,64110	1,63858	-0,341940	-0,353660	-0,0338300	-0,246320
1,47735	1,53969	1,64227	1,64052	-0,359130	-0,372010	-0,0375800	-0,259810
1,47846	1,54174	1,64350	1,64229	-0,372770	-0,379600	-0,0442500	-0,264510
1,47992	1,54434	1,64425	1,64305	-0,393080	-0,379400	-0,0493000	-0,269750
1,48167	1,54705	1,64507	1,64305	-0,416080	-0,375150	-0,0553700	-0,276630
1,48286	1,54869	1,64609	1,64367	-0,427380	-0,379240	-0,0623200	-0,280930
1,48551	1,55219	1,64698	1,64140	-0,462400	-0,358090	-0,0673300	-0,292530
1,48722	1,55426	1,64792	1,64111	-0,478670	-0,353840	-0,0751700	-0,298580
1,48905	1,55638	1,64906	1,64055	-0,495670	-0,348380	-0,0836700	-0,305410
1,49099	1,55868	1,64987	1,64004	-0,512360	-0,338740	-0,0912600	-0,310600
1,49248	1,56035	1,65097	1,63962	-0,525640	-0,338890	-0,104970	-0,314410
1,46439	1,52334	1,64006	1,62778	-0,406450	-0,455910	-0,0110600	-0,403580

Profondeur des bandes				Largeur des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
-0,0267000	-0,0387700	-0,00141000	-0,0427000	0,0733500	0,102980	0,0391700	0,162850
-0,0281600	-0,0406800	-0,00150000	-0,0437900	0,0736700	0,102730	0,0374000	0,158340
-0,0293300	-0,0410600	-0,00175000	-0,0438600	0,0739300	0,101610	0,0372400	0,155770
-0,0312500	-0,0398800	-0,00194000	-0,0439100	0,0746800	0,0987600	0,0369600	0,152920
-0,0334100	-0,0379600	-0,00213000	-0,0443200	0,0754400	0,0950600	0,0361100	0,150510
-0,0343300	-0,0377200	-0,00236000	-0,0441200	0,0754700	0,0934400	0,0355700	0,147540
-0,0379700	-0,0330600	-0,00245000	-0,0456500	0,0771400	0,0867200	0,0342200	0,146610
-0,0396400	-0,0315700	-0,00271000	-0,0460200	0,0777900	0,0838200	0,0338400	0,144800
-0,0414900	-0,0299000	-0,00293000	-0,0462300	0,0786400	0,0806300	0,0328900	0,142210
-0,0437000	-0,0278800	-0,00314000	-0,0461000	0,0801200	0,0773200	0,0323300	0,139420
-0,0451700	-0,0271200	-0,00364000	-0,0457200	0,0807300	0,0751800	0,0325300	0,136600
-0,0293400	-0,0515400	-0,000233588	-0,0750100	0,0678100	0,106200	0,0198300	0,174600

Référence des spectres	Température T (K)	Incertitude sur T (K)	Taille de grains D (μm)	Incertitude sur D (μm)
20090317/Spectre 20	170,000	1,00000	1023,000	30,0000
20090317/Spectre 21	160,000	1,00000	1023,000	30,0000
20090317/Spectre 22	150,000	1,00000	1023,000	30,0000
20090317/Spectre 23	140,000	1,00000	1023,000	30,0000
20090317/Spectre 24	130,000	1,00000	1023,000	30,0000
20090317/Spectre 25	120,000	1,00000	1023,000	30,0000
20090317/Spectre 26	110,000	1,00000	1023,000	30,0000
20090317/Spectre 27	100,000	1,00000	1023,000	30,0000
20090317/Spectre 28	90,0000	1,00000	1023,000	30,0000
20090317/Spectre 29	80,0000	1,00000	1023,000	30,0000
20090409/Spectre 16	180,000	1,00000	690,000	30,0000
20090409/Spectre 17	170,000	1,00000	690,000	30,0000

Position des bandes				Aire des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
1,46434	1,52367	1,64184	1,62913	-0,417870	-0,476740	-0,0133400	-0,415940
1,46446	1,52404	1,64392	1,63029	-0,426630	-0,488830	-0,0152900	-0,428890
1,46474	1,52490	1,64454	1,63324	-0,420980	-0,501910	-0,0178400	-0,427020
1,46584	1,52662	1,64544	1,63459	-0,433840	-0,505870	-0,0231600	-0,435850
1,46694	1,52860	1,64712	1,63644	-0,443750	-0,514300	-0,0268600	-0,437770
1,46791	1,53047	1,64792	1,63923	-0,445990	-0,531030	-0,0334400	-0,436600
1,46884	1,53245	1,64884	1,64112	-0,453060	-0,542410	-0,0383400	-0,434630
1,46985	1,53510	1,64989	1,64510	-0,456550	-0,564580	-0,0498700	-0,431340
1,47096	1,53704	1,65095	1,64551	-0,468580	-0,566720	-0,0555900	-0,431450
1,47171	1,53945	1,65163	1,64825	-0,472310	-0,586660	-0,0646900	-0,424840
1,47088	1,53236	1,63933	1,63682	-0,388880	-0,447470	-0,0217700	-0,316690
1,46981	1,53125	1,64121	1,63637	-0,398550	-0,463570	-0,0218000	-0,342110

Profondeur des bandes				Largeur des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
-0,0305600	-0,0545500	-0,000280011	-0,0762500	0,0687100	0,107500	0,0197300	0,172220
-0,0312100	-0,0560700	-0,000339836	-0,0779300	0,0687200	0,107760	0,0208700	0,170700
-0,0309300	-0,0586200	-0,000392148	-0,0753400	0,0690200	0,109730	0,0206500	0,165750
-0,0320000	-0,0585100	-0,000547670	-0,0763700	0,0693000	0,108650	0,0222200	0,164600
-0,0329100	-0,0592700	-0,000706878	-0,0747100	0,0696800	0,108270	0,0247300	0,160330
-0,0332700	-0,0616600	-0,000872503	-0,0720600	0,0700700	0,109090	0,0245100	0,155060
-0,0337500	-0,0626700	-0,00105000	-0,0692400	0,0699900	0,108540	0,0257200	0,149650
-0,0348400	-0,0671300	-0,00150000	-0,0667500	0,0716800	0,111700	0,0281900	0,145370
-0,0357200	-0,0663100	-0,00170000	-0,0649000	0,0716100	0,109920	0,0287800	0,141320
-0,0362300	-0,0694900	-0,00199000	-0,0607400	0,0720600	0,111270	0,0288800	0,134320
-0,0302400	-0,0510900	-0,000712540	-0,0527300	0,0730500	0,107260	0,0307500	0,156410
-0,0308200	-0,0530600	-0,000638091	-0,0574400	0,0726400	0,107540	0,0275000	0,157730

Référence des spectres	Température T (K)	Incertitude sur T (K)	Taille de grains D (μm)	Incertitude sur D (μm)
20090409/Spectre 18	160,000	1,00000	690,000	30,0000
20090409/Spectre 19	150,000	1,00000	690,000	30,0000
20090409/Spectre 20	140,000	1,00000	690,000	30,0000
20090409/Spectre 21	130,000	1,00000	690,000	30,0000
20090409/Spectre 22	120,000	1,00000	690,000	30,0000
20090409/Spectre 23	110,000	1,00000	690,000	30,0000
20090409/Spectre 24	100,000	1,00000	690,000	30,0000
20090409/Spectre 25	90,0000	1,00000	690,000	30,0000
20090409/Spectre 26	80,0000	1,00000	690,000	30,0000
20090410/Spectre 3	180,000	1,00000	755,000	30,0000
20090410/Spectre 4	170,000	1,00000	755,000	30,0000
20090410/Spectre 5	160,000	1,00000	755,000	30,0000

Position des bandes				Aire des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
1,47008	1,53227	1,64225	1,63839	-0,409820	-0,481820	-0,0251300	-0,352090
1,47109	1,53456	1,64312	1,64131	-0,419490	-0,495290	-0,0311500	-0,354570
1,47211	1,53671	1,64451	1,64447	-0,424390	-0,507910	-0,0373000	-0,353420
1,47305	1,53885	1,64528	1,64715	-0,428200	-0,521140	-0,0425400	-0,350190
1,47462	1,54243	1,64642	1,65131	-0,441290	-0,537980	-0,0559700	-0,346220
1,47551	1,54405	1,64769	1,65242	-0,445940	-0,545110	-0,0637300	-0,346630
1,47667	1,54667	1,64857	1,65480	-0,456720	-0,555570	-0,0747200	-0,343740
1,47810	1,55057	1,64940	1,65863	-0,468230	-0,568930	-0,0895200	-0,330120
1,47939	1,55479	1,65033	1,66259	-0,481560	-0,585870	-0,107920	-0,314820
1,46821	1,52906	1,64172	1,63442	-0,398360	-0,466720	-0,0179100	-0,361750
1,46898	1,53073	1,64263	1,63698	-0,404590	-0,479140	-0,0207600	-0,364105
1,47007	1,53298	1,64351	1,64025	-0,410390	-0,491570	-0,0279600	-0,363440

Profondeur des bandes				Largeur des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
-0,0316200	-0,0553800	-0,000739482	-0,0577500	0,0724800	0,107980	0,0276400	0,154080
-0,0324900	-0,0570200	-0,000935271	-0,0566300	0,0727700	0,108160	0,0282100	0,150050
-0,0330800	-0,0590300	-0,00117000	-0,0549500	0,0732200	0,109190	0,0295400	0,146070
-0,0334600	-0,0607200	-0,00134000	-0,0521100	0,0734100	0,109460	0,0295300	0,139790
-0,0349200	-0,0631800	-0,00185000	-0,0495600	0,0743400	0,110330	0,0311100	0,134470
-0,0353300	-0,0639500	-0,00210000	-0,0483700	0,0744300	0,110200	0,0310100	0,131100
-0,0365500	-0,0653500	-0,00254000	-0,0464400	0,0751800	0,110500	0,0319600	0,126920
-0,0379200	-0,0675700	-0,00316000	-0,0418400	0,0760900	0,111570	0,0331700	0,119060
-0,0397600	-0,0707500	-0,00392000	-0,0371600	0,0775600	0,113440	0,0341100	0,110880
-0,0300500	-0,0532400	-0,000459116	-0,0612500	0,0708700	0,107160	0,0240800	0,159050
-0,0306200	-0,0548700	-0,000532877	-0,0599300	0,0710900	0,107590	0,0241100	0,154640
-0,0313300	-0,0567600	-0,000785477	-0,0584900	0,0717100	0,108480	0,0264000	0,151200

Référence des spectres	Température T (K)	Incertitude sur T (K)	Taille de grains D (μm)	Incertitude sur D (μm)
20090410/Spectre 6	150,000	1,00000	755,000	30,0000
20090410/Spectre 7	140,000	1,00000	755,000	30,0000
20090410/Spectre 8	130,000	1,00000	755,000	30,0000
20090410/Spectre 9	120,000	1,00000	755,000	30,0000
20090410/Spectre 10	110,000	1,00000	755,000	30,0000
20090410/Spectre 11	100,000	1,00000	755,000	30,0000
20090410/Spectre 12	90,0000	1,00000	755,000	30,0000
20090410/Spectre 13	80,0000	1,00000	755,000	30,0000
20090410/Spectre 16	180,000	1,00000	768,000	30,0000
20090410/Spectre 17	170,000	1,00000	768,000	30,0000
20090410/Spectre 18	160,000	1,00000	768,000	30,0000
20090410/Spectre 19	150,000	1,00000	768,000	30,0000

Position des bandes				Aire des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
1,47114	1,53568	1,64454	1,64419	-0,416540	-0,509450	-0,0345200	-0,359350
1,47222	1,53728	1,64605	1,64531	-0,423220	-0,513510	-0,0408300	-0,363800
1,47346	1,54047	1,64690	1,64921	-0,431390	-0,529620	-0,0500300	-0,356510
1,47437	1,54261	1,64770	1,65148	-0,435670	-0,541450	-0,0589700	-0,354260
1,47532	1,54472	1,64879	1,65339	-0,443200	-0,554830	-0,0677400	-0,353370
1,47654	1,54832	1,64948	1,65710	-0,454110	-0,568870	-0,0819000	-0,342460
1,47750	1,55060	1,65048	1,65887	-0,460720	-0,578950	-0,0941200	-0,336330
1,47892	1,55429	1,65164	1,66145	-0,471560	-0,587130	-0,110900	-0,321750
1,46978	1,53010	1,63935	1,63383	-0,398180	-0,461660	-0,0179100	-0,339380
1,46919	1,52940	1,64072	1,63301	-0,404770	-0,466080	-0,0180700	-0,355930
1,46922	1,53018	1,64172	1,63542	-0,415050	-0,487200	-0,0202600	-0,365870
1,46940	1,53060	1,64294	1,63595	-0,423680	-0,492720	-0,0221500	-0,380460

Profondeur des bandes				Largeur des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
-0,0320300	-0,0595700	-0,000996134	-0,0555200	0,0722400	0,109850	0,0271100	0,145150
-0,0325900	-0,0595500	-0,00123000	-0,0554100	0,0723400	0,108940	0,0283500	0,143080
-0,0335600	-0,0622200	-0,00157000	-0,0519000	0,0730900	0,110360	0,0295400	0,136770
-0,0341500	-0,0640700	-0,00191000	-0,0499000	0,0736300	0,111160	0,0303700	0,132330
-0,0347500	-0,0656900	-0,00219000	-0,0478400	0,0736500	0,111220	0,0303300	0,127190
-0,0361400	-0,0682400	-0,00278000	-0,0442000	0,0747700	0,112700	0,0318800	0,121240
-0,0369400	-0,0699100	-0,00328000	-0,0417700	0,0753100	0,113430	0,0327000	0,116670
-0,0382900	-0,0714000	-0,00398000	-0,0376700	0,0762900	0,114240	0,0337200	0,109980
-0,0304000	-0,0524000	-0,000502373	-0,0574100	0,0717300	0,106640	0,0263600	0,158920
-0,0306300	-0,0526900	-0,000480986	-0,0609700	0,0710800	0,106210	0,0250100	0,160930
-0,0315800	-0,0557200	-0,000526327	-0,0615300	0,0714900	0,107440	0,0244000	0,157990
-0,0320400	-0,0559900	-0,000599405	-0,0638200	0,0710500	0,106760	0,0254200	0,157590

Référence des spectres	Température T (K)	Incertitude sur T (K)	Taille de grains D (μm)	Incertitude sur D (μm)
20090410/Spectre 20	140,000	1,00000	768,000	30,0000
20090410/Spectre 21	130,000	1,00000	768,000	30,0000
20090410/Spectre 22	120,000	1,00000	768,000	30,0000
20090410/Spectre 23	110,000	1,00000	768,000	30,0000
20090410/Spectre 24	100,000	1,00000	768,000	30,0000
20090410/Spectre 25	90,0000	1,00000	768,000	30,0000
20090410/Spectre 26	80,0000	1,00000	768,000	30,0000
20090414/Spectre 3	180,000	1,00000	678,000	30,0000
20090414/Spectre 4	170,000	1,00000	678,000	30,0000
20090414/Spectre 5	160,000	1,00000	678,000	30,0000
20090414/Spectre 6	150,000	1,00000	678,000	30,0000
20090414/Spectre 7	140,000	1,00000	678,000	30,0000

Position des bandes				Aire des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
1,47026	1,53314	1,64370	1,64083	-0,431560	-0,521250	-0,0290200	-0,378940
1,47146	1,53605	1,64464	1,64480	-0,442350	-0,541470	-0,0348600	-0,377330
1,47247	1,53789	1,64581	1,64649	-0,447840	-0,551550	-0,0432000	-0,378700
1,47369	1,54036	1,64694	1,64893	-0,456320	-0,561610	-0,0512300	-0,377420
1,47504	1,54402	1,64766	1,65332	-0,465570	-0,582100	-0,0624700	-0,369090
1,47611	1,54599	1,64895	1,65462	-0,472240	-0,587840	-0,0732600	-0,367550
1,47736	1,54951	1,65005	1,65803	-0,481570	-0,605890	-0,0888300	-0,357650
1,46822	1,52875	1,64087	1,63365	-0,407980	-0,473290	-0,0177500	-0,365940
1,46919	1,53046	1,64229	1,63599	-0,415920	-0,486120	-0,0212900	-0,369670
1,47015	1,53203	1,64315	1,63811	-0,418640	-0,493920	-0,0252600	-0,370440
1,47131	1,53449	1,64434	1,64142	-0,427230	-0,507900	-0,0328200	-0,370065
1,47233	1,53686	1,64542	1,64483	-0,433330	-0,523740	-0,0398700	-0,369054

Profondeur des bandes				Largeur des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
-0,0330000	-0,0605700	-0,000836314	-0,0609900	0,0718300	0,109170	0,0270700	0,151210
-0,0341900	-0,0634700	-0,00105000	-0,0579400	0,0726100	0,110120	0,0283600	0,144250
-0,0345100	-0,0644700	-0,00131000	-0,0567600	0,0724000	0,109820	0,0285000	0,140810
-0,0353800	-0,0657700	-0,00156000	-0,0547200	0,0728400	0,110020	0,0286600	0,136210
-0,0365800	-0,0692100	-0,00199000	-0,0503700	0,0738000	0,111700	0,0299100	0,128200
-0,0373400	-0,0698300	-0,00246000	-0,0492500	0,0742700	0,111600	0,0315600	0,125890
-0,0385300	-0,0729100	-0,00304000	-0,0451100	0,0751600	0,113040	0,0321900	0,118480
-0,0308000	-0,0538700	-0,000453339	-0,0626700	0,0709300	0,106920	0,0240000	0,160890
-0,0314300	-0,0552800	-0,000564552	-0,0616600	0,0709900	0,106830	0,0249200	0,156710
-0,0316800	-0,0561500	-0,000685478	-0,0603900	0,0711000	0,106810	0,0254900	0,153160
-0,0325600	-0,0581700	-0,000946068	-0,0588000	0,0716000	0,107600	0,0270800	0,149260
-0,0334100	-0,0605900	-0,00118000	-0,0566000	0,0724200	0,108670	0,0278700	0,144070

Référence des spectres	Température T (K)	Incertitude sur T (K)	Taille de grains D (μm)	Incertitude sur D (μm)
20090414/Spectre 8	130,000	1,00000	678,000	30,0000
20090414/Spectre 9	120,000	1,00000	678,000	30,0000
20090414/Spectre 10	110,000	1,00000	678,000	30,0000
20090414/Spectre 11	100,000	1,00000	678,000	30,0000
20090414/Spectre 12	90,0000	1,00000	678,000	30,0000
20090414/Spectre 13	80,0000	1,00000	678,000	30,0000
20090414/Spectre 16	180,000	1,00000	188,000	30,0000
20090414/Spectre 17	170,000	1,00000	188,000	30,0000
20090414/Spectre 18	160,000	1,00000	188,000	30,0000
20090414/Spectre 19	150,000	1,00000	188,000	30,0000
20090414/Spectre 20	140,000	1,00000	188,000	30,0000
20090414/Spectre 21	130,000	1,00000	188,000	30,0000

Position des bandes				Aire des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
1,47326	1,53888	1,64643	1,64715	-0,439390	-0,535310	-0,0468700	-0,367780
1,47423	1,54101	1,64754	1,64931	-0,446810	-0,546880	-0,0549800	-0,365910
1,47509	1,54286	1,64818	1,65087	-0,453910	-0,554110	-0,0637100	-0,365180
1,47639	1,54669	1,64903	1,65548	-0,461690	-0,576900	-0,0754900	-0,353940
1,47750	1,54933	1,64994	1,65747	-0,471810	-0,587870	-0,0891800	-0,348120
1,47866	1,55202	1,65109	1,65898	-0,483490	-0,595130	-0,106310	-0,340750
1,47848	1,54141	1,64018	1,64586	-0,351940	-0,398010	-0,0368300	-0,236600
1,47948	1,54297	1,64153	1,64700	-0,362220	-0,406280	-0,0424800	-0,242080
1,48074	1,54609	1,64243	1,65210	-0,372370	-0,425860	-0,0533800	-0,238630
1,48161	1,54735	1,64348	1,65237	-0,380320	-0,429630	-0,0584400	-0,243010
1,48407	1,55097	1,64441	1,64942	-0,425660	-0,410010	-0,0624600	-0,258070
1,48474	1,55230	1,64534	1,65273	-0,419260	-0,428090	-0,0731400	-0,252860

Profondeur des bandes				Largeur des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
-0,0339300	-0,0621300	-0,00144000	-0,0546600	0,0725400	0,109030	0,0288900	0,139630
-0,0346300	-0,0636300	-0,00171000	-0,0527600	0,0728200	0,109300	0,0292900	0,135450
-0,0353400	-0,0643400	-0,00206000	-0,0514800	0,0731400	0,109080	0,0303800	0,132430
-0,0364100	-0,0685100	-0,00252000	-0,0466300	0,0740900	0,111570	0,0314100	0,123780
-0,0374700	-0,0700000	-0,00304000	-0,0439700	0,0746100	0,111860	0,0320200	0,118660
-0,0387600	-0,0706700	-0,00374000	-0,0415000	0,0753100	0,111560	0,0330900	0,114410
-0,0269400	-0,0440800	-0,00148000	-0,0360200	0,0719200	0,104040	0,0378500	0,143030
-0,0277200	-0,0446300	-0,00173000	-0,0363000	0,0719100	0,103190	0,0382400	0,140860
-0,0287100	-0,0471800	-0,00220000	-0,0340800	0,0724200	0,104070	0,0386900	0,134150
-0,0292400	-0,0469900	-0,00237000	-0,0341400	0,0722400	0,102750	0,0381400	0,131990
-0,0338000	-0,0414500	-0,00241000	-0,0364300	0,0746000	0,0949700	0,0363200	0,132630
-0,0329500	-0,0441000	-0,00280000	-0,0340200	0,0738400	0,0967700	0,0359200	0,126410

Référence des spectres	Température T (K)	Incertitude sur T (K)	Taille de grains D (μm)	Incertitude sur D (μm)
20090414/Spectre 22	120,000	1,00000	188,000	30,0000
20090414/Spectre 23	110,000	1,00000	188,000	30,0000
20090414/Spectre 24	100,000	1,00000	188,000	30,0000
20090414/Spectre 25	90,0000	1,00000	188,000	30,0000
20090414/Spectre 26	80,0000	1,00000	188,000	30,0000
20090415/Spectre 3	180,000	1,00000	585,000	30,0000
20090415/Spectre 4	170,000	1,00000	585,000	30,0000
20090415/Spectre 5	160,000	1,00000	585,000	30,0000
20090415/Spectre 6	150,000	1,00000	585,000	30,0000
20090415/Spectre 7	140,000	1,00000	585,000	30,0000
20090415/Spectre 8	130,000	1,00000	585,000	30,0000
20090415/Spectre 9	120,000	1,00000	585,000	30,0000

Position des bandes				Aire des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
1,48741	1,55482	1,64658	1,64802	-0,462440	-0,404090	-0,0763700	-0,272910
1,48933	1,55617	1,64784	1,64466	-0,482660	-0,386920	-0,0823500	-0,286490
1,49163	1,55916	1,64864	1,64475	-0,505770	-0,383760	-0,0878500	-0,293460
1,49295	1,56051	1,64969	1,64448	-0,516540	-0,385530	-0,0975100	-0,298820
1,49576	1,56326	1,65116	1,64269	-0,540630	-0,367550	-0,110750	-0,309680
1,47059	1,53145	1,64121	1,63572	-0,404860	-0,468870	-0,0224700	-0,349560
1,47160	1,53342	1,64255	1,63853	-0,416370	-0,484100	-0,0270200	-0,354980
1,47241	1,53506	1,64373	1,64070	-0,423940	-0,496730	-0,0324800	-0,358080
1,47358	1,53701	1,64463	1,64267	-0,430950	-0,505080	-0,0398100	-0,359630
1,47456	1,54037	1,64565	1,64834	-0,436820	-0,530630	-0,0510900	-0,350120
1,47571	1,54236	1,64656	1,64965	-0,448230	-0,538510	-0,0579600	-0,352110
1,47660	1,54468	1,64736	1,65259	-0,451460	-0,554170	-0,0677400	-0,348100

Profondeur des bandes				Largeur des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
-0,0371300	-0,0380200	-0,00277000	-0,0374700	0,0754300	0,0883900	0,0340200	0,128980
-0,0388800	-0,0342100	-0,00287000	-0,0398500	0,0756700	0,0830500	0,0327800	0,130660
-0,0416700	-0,0323200	-0,00292000	-0,0387000	0,0774000	0,0791100	0,0312300	0,123880
-0,0427700	-0,0315700	-0,00317000	-0,0383900	0,0777800	0,0769400	0,0305100	0,120700
-0,0462000	-0,0281500	-0,00354000	-0,0391000	0,0802900	0,0719500	0,0300200	0,118620
-0,0305600	-0,0530000	-0,000658842	-0,0585400	0,0709000	0,106190	0,0275500	0,157330
-0,0314700	-0,0547300	-0,000791154	-0,0577800	0,0710100	0,106200	0,0275100	0,152920
-0,0321800	-0,0563100	-0,000980676	-0,0570600	0,0713200	0,106500	0,0283700	0,149700
-0,0327300	-0,0570300	-0,00125000	-0,0560600	0,0713400	0,106080	0,0294800	0,146450
-0,0338300	-0,0616800	-0,00168000	-0,0519500	0,0727500	0,109200	0,0309400	0,139390
-0,0346900	-0,0620200	-0,00193000	-0,0506700	0,0727200	0,108190	0,0313100	0,135180
-0,0351700	-0,0645300	-0,00227000	-0,0481000	0,0731800	0,109380	0,0314200	0,129810

Référence des spectres	Température T (K)	Incertitude sur T (K)	Taille de grains D (μm)	Incertitude sur D (μm)
20090415/Spectre 10	110,000	1,00000	585,000	30,0000
20090415/Spectre 11	100,000	1,00000	585,000	30,0000
20090415/Spectre 12	90,0000	1,00000	585,000	30,0000
20090415/Spectre 13	80,0000	1,00000	585,000	30,0000
20090415/Spectre 16	180,000	1,00000	612,000	30,0000
20090415/Spectre 17	170,000	1,00000	612,000	30,0000
20090415/Spectre 18	160,000	1,00000	612,000	30,0000
20090415/Spectre 19	150,000	1,00000	612,000	30,0000
20090415/Spectre 20	140,000	1,00000	612,000	30,0000
20090415/Spectre 21	130,000	1,00000	612,000	30,0000
20090415/Spectre 22	120,000	1,00000	612,000	30,0000
20090415/Spectre 23	110,000	1,00000	612,000	30,0000

Position des bandes				Aire des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
1,47774	1,54780	1,64815	1,65600	-0,460950	-0,565530	-0,0800600	-0,338970
1,47858	1,54893	1,64928	1,65580	-0,469230	-0,571320	-0,0900900	-0,343120
1,47980	1,55223	1,65001	1,65895	-0,479380	-0,583590	-0,103510	-0,332450
1,48102	1,55512	1,65109	1,66069	-0,490960	-0,593720	-0,121840	-0,323510
1,47241	1,53420	1,63963	1,63953	-0,392360	-0,461290	-0,0255800	-0,311130
1,47268	1,53444	1,64081	1,63862	-0,404330	-0,464980	-0,0259200	-0,327580
1,47368	1,53753	1,64196	1,64416	-0,415880	-0,492380	-0,0358700	-0,324040
1,47449	1,53826	1,64337	1,64406	-0,421300	-0,493250	-0,0397700	-0,333110
1,47584	1,54143	1,64445	1,64843	-0,429770	-0,509660	-0,0497100	-0,327760
1,47699	1,54402	1,64531	1,65152	-0,439610	-0,527810	-0,0594600	-0,325150
1,47822	1,54708	1,64647	1,65497	-0,448790	-0,541310	-0,0715100	-0,319900
1,47945	1,54929	1,64739	1,65607	-0,463760	-0,543020	-0,0818800	-0,320940

Profondeur des bandes				Largeur des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
-0,0364000	-0,0665400	-0,00277000	-0,0449500	0,0741900	0,110540	0,0325300	0,124590
-0,0369000	-0,0663000	-0,00313000	-0,0446900	0,0738700	0,109010	0,0326000	0,122350
-0,0381400	-0,0683900	-0,00369000	-0,0410000	0,0747400	0,110090	0,0334600	0,115850
-0,0394900	-0,0695700	-0,00442000	-0,0380000	0,0755600	0,110080	0,0340500	0,110340
-0,0304700	-0,0529600	-0,000857639	-0,0505200	0,0729600	0,107850	0,0315000	0,152550
-0,0310400	-0,0523400	-0,000814189	-0,0530200	0,0721300	0,105740	0,0295100	0,152060
-0,0323300	-0,0566700	-0,00122000	-0,0502800	0,0730300	0,108110	0,0318900	0,145770
-0,0326700	-0,0561700	-0,00133000	-0,0517300	0,0728400	0,106970	0,0314700	0,145890
-0,0337200	-0,0585800	-0,00171000	-0,0486600	0,0737200	0,107970	0,0323400	0,139460
-0,0343900	-0,0607100	-0,00211000	-0,0461000	0,0734800	0,108050	0,0333900	0,133190
-0,0355400	-0,0628100	-0,00254000	-0,0433500	0,0744000	0,109010	0,0333800	0,127290
-0,0371900	-0,0623300	-0,00302000	-0,0429700	0,0753300	0,107840	0,0347000	0,125780

Référence des spectres	Température T (K)	Incertitude sur T (K)	Taille de grains D (μm)	Incertitude sur D (μm)
20090415/Spectre 24	100,000	1,00000	612,000	30,0000
20090415/Spectre 25	90,0000	1,00000	612,000	30,0000
20090415/Spectre 26	80,0000	1,00000	612,000	30,0000
20090415/Spectre 29	180,000	1,00000	557,000	30,0000
20090415/Spectre 30	170,000	1,00000	557,000	30,0000
20090415/Spectre 31	160,000	1,00000	557,000	30,0000
20090415/Spectre 32	150,000	1,00000	557,000	30,0000
20090415/Spectre 33	140,000	1,00000	557,000	30,0000
20090415/Spectre 34	130,000	1,00000	557,000	30,0000
20090415/Spectre 35	120,000	1,00000	557,000	30,0000
20090415/Spectre 36	110,000	1,00000	557,000	30,0000
20090415/Spectre 37	100,000	1,00000	557,000	30,0000

Position des bandes				Aire des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
1,48045	1,55182	1,64833	1,65862	-0,470940	-0,558860	-0,0955200	-0,314870
1,48187	1,55454	1,64931	1,65934	-0,492410	-0,561500	-0,109120	-0,314610
1,48396	1,55803	1,65029	1,65945	-0,524470	-0,561770	-0,125310	-0,316000
1,46989	1,53031	1,64133	1,63450	-0,394040	-0,455810	-0,0195900	-0,346620
1,47083	1,53225	1,64222	1,63739	-0,400650	-0,466870	-0,0242400	-0,348470
1,47186	1,53442	1,64334	1,64063	-0,406640	-0,481180	-0,0305500	-0,348250
1,47288	1,53666	1,64437	1,64382	-0,412000	-0,496120	-0,0366900	-0,347320
1,47391	1,53883	1,64553	1,64670	-0,418670	-0,509650	-0,0444800	-0,347510
1,47508	1,54158	1,64619	1,64950	-0,427930	-0,521750	-0,0527500	-0,343590
1,47607	1,54421	1,64737	1,65251	-0,434040	-0,534950	-0,0624200	-0,337150
1,47698	1,54536	1,64840	1,65249	-0,443540	-0,537310	-0,0712500	-0,343820
1,47794	1,54816	1,64925	1,65538	-0,452260	-0,555810	-0,0832500	-0,339030

Profondeur des bandes				Largeur des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
-0,0377100	-0,0643900	-0,00348000	-0,0398600	0,0752200	0,108230	0,0342300	0,118930
-0,0400400	-0,0635600	-0,00400000	-0,0387000	0,0763900	0,106350	0,0344100	0,115560
-0,0435100	-0,0612300	-0,00461000	-0,0372700	0,0779400	0,102380	0,0345400	0,110810
-0,0295200	-0,0512100	-0,000526101	-0,0583200	0,0703700	0,105550	0,0252300	0,158050
-0,0301800	-0,0526900	-0,000691772	-0,0571600	0,0707700	0,106020	0,0268100	0,154110
-0,0307900	-0,0546900	-0,000882895	-0,0555900	0,0711400	0,106770	0,0271500	0,149960
-0,0314300	-0,0569100	-0,00111000	-0,0535100	0,0716600	0,107770	0,0285300	0,144750
-0,0322600	-0,0590100	-0,00139000	-0,0521000	0,0723900	0,108780	0,0293900	0,140850
-0,0329800	-0,0603800	-0,00169000	-0,0494200	0,0723900	0,108720	0,0300800	0,135110
-0,0337900	-0,0626100	-0,00209000	-0,0465400	0,0731300	0,109950	0,0315200	0,129670
-0,0345700	-0,0620800	-0,00239000	-0,0472100	0,0732200	0,108550	0,0315300	0,129000
-0,0353200	-0,0647300	-0,00281000	-0,0440700	0,0733600	0,109400	0,0317300	0,122110

Référence des spectres	Température T (K)	Incertitude sur T (K)	Taille de grains D (μm)	Incertitude sur D (μm)
20090415/Spectre 38	90,0000	1,00000	557,000	30,0000
20090415/Spectre 39	80,0000	1,00000	557,000	30,0000
20090415/Spectre 42	180,000	1,00000	542,000	30,0000
20090415/Spectre 43	170,000	1,00000	542,000	30,0000
20090415/Spectre 44	160,000	1,00000	542,000	30,0000
20090415/Spectre 45	150,000	1,00000	542,000	30,0000
20090415/Spectre 46	140,000	1,00000	542,000	30,0000
20090415/Spectre 47	130,000	1,00000	542,000	30,0000
20090415/Spectre 48	120,000	1,00000	542,000	30,0000
20090415/Spectre 49	110,000	1,00000	542,000	30,0000
20090415/Spectre 50	100,000	1,00000	542,000	30,0000
20090415/Spectre 51	90,0000	1,00000	542,000	30,0000

Position des bandes				Aire des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
1,47912	1,55156	1,65015	1,65872	-0,464040	-0,568240	-0,0980400	-0,328680
1,48030	1,55424	1,65122	1,66035	-0,473310	-0,580580	-0,113760	-0,320620
1,47305	1,53475	1,63983	1,63894	-0,385010	-0,440630	-0,0250500	-0,299750
1,47306	1,53472	1,64140	1,63864	-0,406560	-0,463950	-0,0277300	-0,328720
1,47384	1,53653	1,64243	1,64187	-0,416130	-0,484470	-0,0345100	-0,333370
1,47514	1,53973	1,64335	1,64648	-0,428320	-0,504940	-0,0436500	-0,329960
1,47633	1,54252	1,64452	1,65008	-0,435700	-0,520680	-0,0536200	-0,326040
1,47732	1,54432	1,64548	1,65165	-0,444410	-0,529630	-0,0609700	-0,328400
1,47870	1,54785	1,64668	1,65577	-0,454870	-0,546100	-0,0755600	-0,319310
1,47988	1,54977	1,64773	1,65647	-0,465460	-0,551060	-0,0866100	-0,322380
1,48110	1,55244	1,64858	1,65823	-0,480050	-0,558360	-0,0999600	-0,317770
1,48218	1,55446	1,64955	1,65909	-0,490880	-0,568010	-0,112600	-0,317500

Profondeur des bandes				Largeur des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
-0,0369600	-0,0669600	-0,00347000	-0,0408900	0,0748300	0,110690	0,0332600	0,116860
-0,0378600	-0,0686600	-0,00407000	-0,0377000	0,0751500	0,111100	0,0336400	0,110470
-0,0297900	-0,0498700	-0,000865167	-0,0488000	0,0726900	0,106330	0,0324500	0,152930
-0,0310900	-0,0520200	-0,000885552	-0,0535700	0,0718300	0,105340	0,0300100	0,153100
-0,0320700	-0,0549500	-0,00114000	-0,0528900	0,0724000	0,106560	0,0309200	0,149050
-0,0331600	-0,0577100	-0,00150000	-0,0501500	0,0727400	0,107370	0,0322600	0,142780
-0,0340500	-0,0599900	-0,00191000	-0,0476000	0,0734100	0,108230	0,0334800	0,137140
-0,0347900	-0,0608300	-0,00214000	-0,0466200	0,0735500	0,107900	0,0329900	0,133360
-0,0360100	-0,0632800	-0,00278000	-0,0430900	0,0743800	0,108860	0,0346100	0,126770
-0,0368400	-0,0630200	-0,00312000	-0,0424100	0,0743600	0,107440	0,0338900	0,123600
-0,0383900	-0,0634000	-0,00367000	-0,0402900	0,0751200	0,106670	0,0344800	0,119100
-0,0393800	-0,0640400	-0,00410000	-0,0387200	0,0753700	0,105920	0,0341700	0,114570

Référence des spectres	Température T (K)	Incertitude sur T (K)	Taille de grains D (μm)	Incertitude sur D (μm)
20090415/Spectre 52	80,0000	1,00000	542,000	30,0000
20090416/Spectre 3	180,000	1,00000	686,000	30,0000
20090416/Spectre 4	170,000	1,00000	686,000	30,0000
20090416/Spectre 5	160,000	1,00000	686,000	30,0000
20090416/Spectre 6	150,000	1,00000	686,000	30,0000
20090416/Spectre 7	140,000	1,00000	686,000	30,0000
20090416/Spectre 8	130,000	1,00000	686,000	30,0000
20090416/Spectre 9	120,000	1,00000	686,000	30,0000
20090416/Spectre 10	110,000	1,00000	686,000	30,0000
20090416/Spectre 11	100,000	1,00000	686,000	30,0000
20090416/Spectre 12	90,0000	1,00000	686,000	30,0000
20090416/Spectre 13	80,0000	1,00000	686,000	30,0000

Position des bandes				Aire des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
1,48513	1,55851	1,65065	1,65681	-0,547630	-0,553740	-0,128570	-0,329180
1,46782	1,52771	1,64038	1,63185	-0,387060	-0,447020	-0,0140800	-0,352980
1,46816	1,52847	1,64244	1,63320	-0,399180	-0,461010	-0,0174500	-0,368210
1,46927	1,53083	1,64324	1,63694	-0,407840	-0,479020	-0,0236900	-0,368600
1,47028	1,53311	1,64409	1,64053	-0,413050	-0,496510	-0,0279100	-0,368470
1,47109	1,53451	1,64529	1,64187	-0,420230	-0,506640	-0,0324300	-0,372720
1,47127	1,53754	1,64548	1,64881	-0,410420	-0,515660	-0,0389800	-0,351630
1,47305	1,53925	1,64702	1,64775	-0,432490	-0,532880	-0,0479600	-0,367870
1,47412	1,54163	1,64812	1,65008	-0,440460	-0,543730	-0,0572700	-0,365300
1,47495	1,54420	1,64883	1,65315	-0,445140	-0,555860	-0,0668800	-0,357110
1,47602	1,54677	1,64962	1,65521	-0,453890	-0,571000	-0,0764900	-0,354770
1,47708	1,54895	1,65100	1,65631	-0,463430	-0,580120	-0,0897200	-0,353050

Profondeur des bandes				Largeur des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
-0,0455400	-0,0576400	-0,00470000	-0,0395200	0,0781200	0,0977900	0,0343400	0,112770
-0,0287200	-0,0503900	-0,000332485	-0,0607900	0,0697100	0,105890	0,0221900	0,161790
-0,0295500	-0,0519600	-0,000417356	-0,0628600	0,0695500	0,105890	0,0224700	0,160380
-0,0304300	-0,0545300	-0,000621883	-0,0609200	0,0701000	0,106950	0,0246600	0,155270
-0,0312200	-0,0572800	-0,000791731	-0,0588100	0,0710100	0,108380	0,0266500	0,149950
-0,0315900	-0,0580900	-0,000906282	-0,0580800	0,0706200	0,107720	0,0262600	0,146380
-0,0322700	-0,0628000	-0,00124000	-0,0534400	0,0738700	0,114420	0,0299700	0,142770
-0,0331200	-0,0622200	-0,00144000	-0,0537400	0,0719300	0,109690	0,0282900	0,137240
-0,0339400	-0,0637300	-0,00181000	-0,0517600	0,0723800	0,110110	0,0296400	0,133110
-0,0347200	-0,0661300	-0,00219000	-0,0488800	0,0732700	0,111770	0,0307100	0,128590
-0,0355600	-0,0681500	-0,00252000	-0,0460500	0,0735900	0,112120	0,0309100	0,121950
-0,0364400	-0,0690700	-0,00303000	-0,0443900	0,0738600	0,111850	0,0316800	0,118110

Référence des spectres	Température T (K)	Incertitude sur T (K)	Taille de grains D (μm)	Incertitude sur D (μm)
20090416/Spectre 16	180,000	1,00000	268,000	30,0000
20090416/Spectre 17	170,000	1,00000	268,000	30,0000
20090416/Spectre 18	160,000	1,00000	268,000	30,0000
20090416/Spectre 19	150,000	1,00000	268,000	30,0000
20090416/Spectre 20	140,000	1,00000	268,000	30,0000
20090416/Spectre 21	130,000	1,00000	268,000	30,0000
20090416/Spectre 22	120,000	1,00000	268,000	30,0000
20090416/Spectre 23	110,000	1,00000	268,000	30,0000
20090416/Spectre 24	100,000	1,00000	268,000	30,0000
20090416/Spectre 25	90,0000	1,00000	268,000	30,0000
20090416/Spectre 26	80,0000	1,00000	268,000	30,0000
20090424/Spectre 1	80,0000	1,00000	473,000	500,000

Position des bandes				Aire des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
1,47835	1,54276	1,63885	1,64923	-0,348880	-0,390020	-0,0390900	-0,216540
1,47941	1,54535	1,64008	1,65321	-0,359720	-0,406680	-0,0457200	-0,217260
1,48027	1,54664	1,64143	1,65384	-0,367440	-0,412290	-0,0508100	-0,221990
1,48184	1,54994	1,64235	1,65659	-0,386000	-0,416740	-0,0603800	-0,221380
1,48295	1,55108	1,64358	1,65571	-0,395780	-0,418530	-0,0652100	-0,228760
1,48556	1,55360	1,64460	1,65023	-0,437450	-0,393530	-0,0662200	-0,248710
1,48984	1,55696	1,64592	1,64088	-0,492040	-0,332680	-0,0608500	-0,282410
1,49100	1,55805	1,64717	1,64056	-0,499430	-0,332160	-0,0678700	-0,288260
1,49257	1,55970	1,64810	1,64037	-0,511680	-0,328970	-0,0746800	-0,293980
1,49459	1,56166	1,64916	1,63914	-0,526980	-0,315740	-0,0815800	-0,302930
1,49602	1,56337	1,65038	1,64058	-0,536720	-0,328560	-0,0957900	-0,304070
1,47996	1,55264	1,64951	1,66024	-0,497100	-0,608160	-0,108380	-0,341000

Profondeur des bandes				Largeur des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
-0,0274600	-0,0438500	-0,00176000	-0,0325900	0,0739400	0,105620	0,0422600	0,141400
-0,0284900	-0,0460200	-0,00204000	-0,0313000	0,0743900	0,106300	0,0418200	0,135360
-0,0290800	-0,0462600	-0,00222000	-0,0316900	0,0743500	0,105400	0,0411000	0,134110
-0,0310000	-0,0460400	-0,00264000	-0,0305400	0,0754500	0,103800	0,0411400	0,129600
-0,0317100	-0,0452700	-0,00274000	-0,0313300	0,0752800	0,101610	0,0395000	0,128660
-0,0358000	-0,0388300	-0,00260000	-0,0347300	0,0768800	0,0927000	0,0368600	0,131180
-0,0418200	-0,0280600	-0,00210000	-0,0412200	0,0798500	0,0792400	0,0323600	0,137100
-0,0424800	-0,0273100	-0,00226000	-0,0414400	0,0799100	0,0772400	0,0313500	0,135060
-0,0439000	-0,0261400	-0,00244000	-0,0414100	0,0805900	0,0746600	0,0306500	0,132310
-0,0460900	-0,0238100	-0,00260000	-0,0420900	0,0821700	0,0708600	0,0299200	0,130540
-0,0471800	-0,0244400	-0,00304000	-0,0401500	0,0825900	0,0698900	0,0298500	0,124060
-0,0396500	-0,0716500	-0,00387000	-0,0416500	0,0749300	0,110680	0,0335400	0,114740

Référence des spectres	Température T (K)	Incertitude sur T (K)	Taille de grains D (μm)	Incertitude sur D (μm)
20090424/Spectre 5	100,000	1,00000	473,000	500,000
20090424/Spectre 9	120,000	1,00000	473,000	500,000
20090424/Spectre 13	140,000	1,00000	473,000	500,000
20090424/Spectre 17	160,000	1,00000	473,000	500,000
20090424/Spectre 21	180,000	1,00000	473,000	500,000

Position des bandes				Aire des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
1,47757	1,54662	1,64746	1,65472	-0,477280	-0,580960	-0,0770200	-0,356290
1,47578	1,54250	1,64602	1,65047	-0,463650	-0,561840	-0,0599800	-0,362640
1,47372	1,53810	1,64396	1,64594	-0,446050	-0,541650	-0,0429000	-0,363970
1,47205	1,53493	1,64238	1,64187	-0,433840	-0,517660	-0,0313200	-0,360510
1,46948	1,53005	1,64110	1,63530	-0,416390	-0,488780	-0,0206700	-0,366710

Profondeur des bandes				Largeur des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
-0,0373900	-0,0676000	-0,00265000	-0,0480300	0,0735900	0,109320	0,0323500	0,126630
-0,0358900	-0,0649200	-0,00202000	-0,0518100	0,0727200	0,108560	0,0316700	0,134220
-0,0342200	-0,0625300	-0,00137000	-0,0548700	0,0720800	0,108460	0,0299700	0,141610
-0,0331000	-0,0593200	-0,000967041	-0,0566600	0,0716800	0,107640	0,0290100	0,147650
-0,0314000	-0,0554400	-0,000553924	-0,0614100	0,0708400	0,106560	0,0251800	0,157320

Liste des paramètres sur les échantillons macroscopiques de glace d'eau tamisés.

Référence des spectres	Température T (K)	Incertitude sur T (K)	Taille de grains D (μm)	Incertitude sur D (μm)
20100209/Spectre 1	80,0000	0,500000	271,840	92,4700
20100209/Spectre 4	90,0000	0,500000	271,840	92,4700
20100209/Spectre 7	100,000	0,400000	271,840	92,4700
20100209/Spectre 10	110,000	0,500000	271,840	92,4700
20100209/Spectre 13	120,000	2,10000	271,840	92,4700
20100209/Spectre 16	130,000	1,70000	271,840	92,4700
20100209/Spectre 19	140,000	0,600000	271,840	92,4700
20100209/Spectre 22	150,000	0,500000	271,840	92,4700
20100210/Spectre 1	76,0000	0,300000	184,770	66,8200
20100210/Spectre 4	80,0000	0,800000	184,770	66,8200
20100210/Spectre 7	90,0000	0,700000	184,770	66,8200
20100210/Spectre 10	100,000	0,600000	184,770	66,8200

Position des bandes				Aire des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
1,48964	1,55882	1,64945	1,64785	-0,577270	-0,478090	-0,110620	-0,339250
1,48736	1,55627	1,64830	1,64921	-0,550140	-0,487300	-0,101720	-0,328890
1,48437	1,55332	1,64718	1,65370	-0,496160	-0,514290	-0,0957200	-0,305460
1,48270	1,55138	1,64600	1,65516	-0,471580	-0,519040	-0,0862500	-0,295050
1,48131	1,54876	1,64500	1,65399	-0,453430	-0,513820	-0,0751400	-0,294220
1,48002	1,54616	1,64399	1,65226	-0,435550	-0,505730	-0,0648000	-0,291560
1,47906	1,54378	1,64298	1,64907	-0,426670	-0,488840	-0,0543100	-0,292590
1,47700	1,54057	1,64259	1,64559	-0,397170	-0,458150	-0,0412400	-0,292140
1,49211	1,56050	1,65020	1,64474	-0,563110	-0,422790	-0,109130	-0,329190
1,49123	1,55966	1,64955	1,64523	-0,549250	-0,420250	-0,102850	-0,321370
1,48898	1,55720	1,64830	1,64591	-0,525470	-0,422930	-0,0904700	-0,312340
1,48636	1,55449	1,64712	1,64841	-0,491920	-0,440740	-0,0836000	-0,298130

Profondeur des bandes				Largeur des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
-0,0475500	-0,0427500	-0,00376000	-0,0430900	0,0773900	0,0840000	0,0319100	0,119310
-0,0445600	-0,0459400	-0,00357000	-0,0430100	0,0760900	0,0885600	0,0329600	0,122840
-0,0391300	-0,0535800	-0,00353000	-0,0397200	0,0740900	0,0978800	0,0346100	0,122150
-0,0369600	-0,0564300	-0,00327000	-0,0386000	0,0736300	0,102140	0,0356200	0,122910
-0,0352600	-0,0569200	-0,00287000	-0,0399100	0,0730400	0,104060	0,0358700	0,127430
-0,0335500	-0,0567000	-0,00249000	-0,0407200	0,0723600	0,105320	0,0361300	0,131200
-0,0327600	-0,0544900	-0,00207000	-0,0425200	0,0721400	0,104720	0,0358200	0,136520
-0,0304300	-0,0512600	-0,00146000	-0,0437600	0,0719700	0,105100	0,0332300	0,140710
-0,0469700	-0,0351700	-0,00359000	-0,0421100	0,0783600	0,0781600	0,0309300	0,120170
-0,0456000	-0,0356500	-0,00344000	-0,0415900	0,0779900	0,0797000	0,0314300	0,121570
-0,0430700	-0,0376300	-0,00309000	-0,0415900	0,0769900	0,0836000	0,0321000	0,125090
-0,0395000	-0,0421800	-0,00298000	-0,0401300	0,0754300	0,0899000	0,0334800	0,126450

Référence des spectres	Température T (K)	Incertitude sur T (K)	Taille de grains D (μm)	Incertitude sur D (μm)
20100210/Spectre 13	110,000	0,800000	184,770	66,8200
20100210/Spectre 16	120,000	0,700000	184,770	66,8200
20100210/Spectre 19	130,000	0,500000	184,770	66,8200
20100210/Spectre 22	140,000	0,400000	184,770	66,8200
20100210/Spectre 25	150,000	0,500000	184,770	66,8200
20100210/Spectre 29	160,000	0,300000	184,770	66,8200
20100210/Spectre 32	170,000	0,500000	184,770	66,8200
20100210/Spectre 35	180,000	0,400000	184,770	66,8200
20100210/Spectre 40	190,000	0,200000	184,770	66,8200
20100210/Spectre 43	200,000	0,500000	184,770	66,8200
20100215/Spectre 1	76,3000	0,200000	786,360	221,620
20100215/Spectre 4	80,0000	0,400000	786,360	221,620

Position des bandes				Aire des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
1,48420	1,55246	1,64590	1,65184	-0,458200	-0,455930	-0,0779100	-0,280860
1,48206	1,54976	1,64488	1,65429	-0,421650	-0,470200	-0,0714200	-0,268030
1,48083	1,54692	1,64397	1,65174	-0,408790	-0,463220	-0,0611800	-0,269900
1,47987	1,54506	1,64306	1,65061	-0,400300	-0,460790	-0,0552100	-0,268350
1,47951	1,54538	1,64217	1,65313	-0,382800	-0,451200	-0,0538100	-0,248990
1,47916	1,54377	1,64183	1,64947	-0,368680	-0,422140	-0,0462300	-0,245720
1,47800	1,54172	1,64125	1,64688	-0,366890	-0,417960	-0,0403500	-0,252600
1,47555	1,53809	1,64030	1,64271	-0,373170	-0,425900	-0,0327000	-0,275160
1,47033	1,53072	1,64025	1,63431	-0,390470	-0,447310	-0,0205600	-0,335110
1,46764	1,52769	1,63921	1,63142	-0,403890	-0,463010	-0,0155700	-0,359520
1,47512	1,54699	1,65160	1,65587	-0,369440	-0,484430	-0,0627100	-0,304180
1,47472	1,54578	1,65119	1,65486	-0,365400	-0,476890	-0,0595000	-0,305670

Profondeur des bandes				Largeur des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
-0,0363300	-0,0467800	-0,00293000	-0,0378100	0,0744800	0,0964000	0,0353100	0,126450
-0,0328600	-0,0515600	-0,00277000	-0,0360700	0,0732000	0,103010	0,0364400	0,126410
-0,0314700	-0,0511000	-0,00237000	-0,0376700	0,0723300	0,103640	0,0363200	0,131100
-0,0307100	-0,0513800	-0,00215000	-0,0382800	0,0720700	0,104750	0,0366100	0,134020
-0,0295800	-0,0514700	-0,00220000	-0,0350800	0,0726000	0,107160	0,0384700	0,132340
-0,0284100	-0,0472800	-0,00185000	-0,0357700	0,0723800	0,105230	0,0376700	0,136750
-0,0282800	-0,0468700	-0,00157000	-0,0378800	0,0724100	0,105340	0,0366300	0,140890
-0,0287600	-0,0479500	-0,00121000	-0,0431000	0,0724000	0,105770	0,0348600	0,147150
-0,0296900	-0,0505600	-0,000603661	-0,0568500	0,0714400	0,106190	0,0275900	0,159380
-0,0307100	-0,0527700	-0,000402513	-0,0625200	0,0714200	0,107070	0,0242900	0,163370
-0,0282900	-0,0597800	-0,00203000	-0,0377900	0,0719300	0,115930	0,0304800	0,116720
-0,0279400	-0,0585000	-0,00193000	-0,0390200	0,0718300	0,115240	0,0304300	0,119920

Référence des spectres	Température T (K)	Incertitude sur T (K)	Taille de grains D (μm)	Incertitude sur D (μm)
20100215/Spectre 7	90,0000	0,300000	786,360	221,620
20100215/Spectre 10	100,000	0,600000	786,360	221,620
20100215/Spectre 13	110,000	0,600000	786,360	221,620
20100215/Spectre 16	120,000	0,800000	786,360	221,620
20100215/Spectre 19	130,000	0,400000	786,360	221,620
20100215/Spectre 22	140,000	0,600000	786,360	221,620
20100215/Spectre 25	150,000	0,600000	786,360	221,620
20100215/Spectre 28	160,000	0,800000	786,360	221,620
20100215/Spectre 31	170,000	0,500000	786,360	221,620
20100215/Spectre 34	180,000	0,400000	786,360	221,620
20100215/Spectre 37	190,000	0,300000	786,360	221,620
20100215/Spectre 40	200,000	0,800000	786,360	221,620

Position des bandes				Aire des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
1,47367	1,54238	1,65040	1,65142	-0,358890	-0,460480	-0,0485800	-0,312990
1,47261	1,54060	1,64875	1,65049	-0,352210	-0,452170	-0,0400400	-0,311000
1,47142	1,53730	1,64781	1,64718	-0,345210	-0,437210	-0,0336000	-0,315040
1,47002	1,53358	1,64701	1,64266	-0,342000	-0,423170	-0,0260300	-0,323870
1,46920	1,53205	1,64597	1,64094	-0,348540	-0,425850	-0,0214300	-0,329200
1,46832	1,52970	1,64535	1,63765	-0,373420	-0,446670	-0,0206400	-0,357830
1,46762	1,52822	1,64466	1,63563	-0,354140	-0,420980	-0,0163200	-0,344050
1,46784	1,52839	1,64348	1,63498	-0,319420	-0,374950	-0,0142100	-0,306050
1,46806	1,52870	1,64302	1,63471	-0,324250	-0,378800	-0,0150600	-0,304230
1,46831	1,52853	1,64184	1,63310	-0,334180	-0,384680	-0,0145600	-0,311160
1,47074	1,53183	1,64070	1,63545	-0,353430	-0,406260	-0,0200100	-0,299230
1,46610	1,52553	1,64010	1,62941	-0,325470	-0,370290	-0,00945000	-0,298580

Profondeur des bandes				Largeur des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
-0,0270400	-0,0553200	-0,00150000	-0,0420000	0,0707800	0,112870	0,0289500	0,126050
-0,0264100	-0,0543900	-0,00119000	-0,0428000	0,0704400	0,113000	0,0278300	0,129300
-0,0257400	-0,0521600	-0,000951413	-0,0457900	0,0700400	0,112080	0,0266000	0,136530
-0,0250700	-0,0494000	-0,000689219	-0,0495800	0,0688700	0,109670	0,0248700	0,143820
-0,0254900	-0,0496000	-0,000541884	-0,0514500	0,0687000	0,109420	0,0237600	0,146820
-0,0271400	-0,0516400	-0,000489423	-0,0582600	0,0682700	0,108610	0,0222700	0,152950
-0,0255900	-0,0483400	-0,000388230	-0,0570100	0,0678900	0,107860	0,0223400	0,155680
-0,0231700	-0,0428300	-0,000335072	-0,0508500	0,0681400	0,107320	0,0221500	0,156080
-0,0236700	-0,0433800	-0,000368670	-0,0508600	0,0685900	0,107580	0,0230000	0,157040
-0,0244000	-0,0437100	-0,000364762	-0,0527300	0,0686000	0,106750	0,0235400	0,159200
-0,0265600	-0,0462100	-0,000599608	-0,0497700	0,0705900	0,106850	0,0281500	0,156260
-0,0243200	-0,0423000	-0,000205162	-0,0525300	0,0701900	0,107300	0,0204000	0,165280

Référence des spectres	Température T (K)	Incertitude sur T (K)	Taille de grains D (μm)	Incertitude sur D (μm)
20100217/Spectre 1	76,7000	2,31000	385,700	122,310
20100217/Spectre 3	81,3176	3,60000	385,700	122,310
20100217/Spectre 4	95,7095	6,80000	385,700	122,310
20100217/Spectre 5	110,101	9,80000	385,700	122,310
20100217/Spectre 6	124,493	12,2000	385,700	122,310
20100217/Spectre 7	138,885	15,4000	385,700	122,310
20100217/Spectre 8	153,277	18,1000	385,700	122,310
20100217/Spectre 9	167,669	21,2000	385,700	122,310
20100217/Spectre 10	182,061	24,3000	385,700	122,310
20100217/Spectre 11	196,453	23,1000	385,700	122,310
20100217/Spectre 14	76,4000	2,12000	385,700	122,310
20100217/Spectre 17	81,3176	3,50000	385,700	122,310

Position des bandes				Aire des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
1,48112	1,55276	1,64973	1,65828	-0,475200	-0,576920	-0,107740	-0,324990
1,48066	1,55162	1,64949	1,65762	-0,467160	-0,572290	-0,101680	-0,326120
1,47953	1,54897	1,64848	1,65559	-0,454880	-0,558790	-0,0866900	-0,329530
1,47731	1,54386	1,64656	1,65083	-0,434720	-0,534460	-0,0620800	-0,336870
1,47589	1,54092	1,64508	1,64793	-0,426710	-0,522800	-0,0503400	-0,339120
1,47463	1,53785	1,64401	1,64311	-0,435150	-0,514490	-0,0405400	-0,355380
1,47355	1,53559	1,64278	1,64055	-0,404110	-0,475560	-0,0310100	-0,333770
1,46882	1,52912	1,64222	1,63432	-0,381020	-0,445150	-0,0174700	-0,350650
1,46781	1,52774	1,64126	1,63223	-0,386980	-0,446280	-0,0152200	-0,354770
1,46480	1,52425	1,64073	1,62851	-0,404950	-0,461780	-0,00840000	-0,380170
1,48805	1,55656	1,64867	1,64928	-0,557120	-0,511470	-0,113130	-0,333410
1,48755	1,55561	1,64812	1,64799	-0,555360	-0,499950	-0,104590	-0,336140

Profondeur des bandes				Largeur des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
-0,0369000	-0,0664900	-0,00388000	-0,0396200	0,0729400	0,108260	0,0338500	0,114540
-0,0361200	-0,0662000	-0,00364000	-0,0404900	0,0726400	0,108670	0,0336000	0,116630
-0,0348900	-0,0644800	-0,00307000	-0,0427700	0,0720500	0,108400	0,0333100	0,121940
-0,0329200	-0,0614800	-0,00209000	-0,0469500	0,0711400	0,108070	0,0316200	0,130940
-0,0321200	-0,0600900	-0,00167000	-0,0492400	0,0707200	0,107970	0,0311800	0,136400
-0,0324500	-0,0579200	-0,00131000	-0,0544100	0,0700500	0,105760	0,0303200	0,143820
-0,0302300	-0,0537000	-0,000972394	-0,0525200	0,0702900	0,106070	0,0294600	0,147810
-0,0279100	-0,0503800	-0,000438433	-0,0587600	0,0688100	0,106320	0,0235800	0,157430
-0,0287900	-0,0506100	-0,000370228	-0,0609600	0,0698900	0,106540	0,0228500	0,161420
-0,0298900	-0,0523400	-0,000160083	-0,0675700	0,0693400	0,106480	0,0179100	0,166980
-0,0439100	-0,0480400	-0,00394000	-0,0423500	0,0740500	0,0882400	0,0327000	0,119340
-0,0438900	-0,0467500	-0,00363000	-0,0438700	0,0742400	0,0878400	0,0326000	0,122600

Référence des spectres	Température T (K)	Incertitude sur T (K)	Taille de grains D (μm)	Incertitude sur D (μm)
20100217/Spectre 18	95,7095	6,40000	385,700	122,310
20100217/Spectre 19	110,101	9,40000	385,700	122,310
20100217/Spectre 21	124,493	12,2000	385,700	122,310
20100217/Spectre 22	138,885	15,4000	385,700	122,310
20100217/Spectre 23	153,277	18,5000	385,700	122,310
20100217/Spectre 25	167,669	21,3000	385,700	122,310
20100217/Spectre 26	182,061	24,3000	385,700	122,310
20100217/Spectre 27	196,453	22,8000	385,700	122,310
20100219/Spectre 1	77,4318	2,49000	271,840	92,4700
20100219/Spectre 2	81,3176	3,20000	271,840	92,4700
20100219/Spectre 3	95,7095	6,90000	271,840	92,4700
20100219/Spectre 4	110,101	9,30000	271,840	92,4700

Position des bandes				Aire des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
1,48381	1,55143	1,64640	1,65218	-0,491540	-0,526320	-0,0928500	-0,310020
1,48168	1,54817	1,64492	1,65269	-0,458440	-0,528180	-0,0790800	-0,300390
1,48029	1,54497	1,64366	1,65046	-0,454460	-0,538080	-0,0682000	-0,306790
1,47934	1,54262	1,64244	1,64733	-0,430240	-0,504410	-0,0550600	-0,296850
1,47936	1,54281	1,64124	1,64793	-0,404620	-0,462790	-0,0491900	-0,264390
1,47554	1,53872	1,64062	1,64445	-0,383520	-0,443100	-0,0345200	-0,275610
1,46906	1,52900	1,64132	1,63236	-0,401000	-0,455830	-0,0181300	-0,353860
1,46596	1,52607	1,64014	1,63093	-0,416190	-0,482130	-0,0131500	-0,378780
1,48967	1,55842	1,64936	1,64674	-0,577280	-0,470490	-0,109550	-0,339750
1,48859	1,55722	1,64857	1,64727	-0,563730	-0,471290	-0,101790	-0,334990
1,48430	1,55273	1,64692	1,65276	-0,491450	-0,507200	-0,0918600	-0,304260
1,48212	1,54978	1,64532	1,65408	-0,458440	-0,511090	-0,0787100	-0,292530

Profondeur des bandes				Largeur des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
-0,0376500	-0,0550800	-0,00345000	-0,0408900	0,0719500	0,0983100	0,0349000	0,123910
-0,0347200	-0,0579800	-0,00303000	-0,0408400	0,0711400	0,103130	0,0359900	0,127730
-0,0339600	-0,0599100	-0,00265000	-0,0433400	0,0701900	0,104590	0,0365500	0,132710
-0,0320300	-0,0559600	-0,00212000	-0,0434300	0,0699400	0,104220	0,0362400	0,137440
-0,0307400	-0,0514700	-0,00202000	-0,0390000	0,0713700	0,104470	0,0385300	0,138570
-0,0297700	-0,0505100	-0,00131000	-0,0424100	0,0729300	0,107080	0,0356400	0,144560
-0,0300800	-0,0512100	-0,000487980	-0,0608000	0,0704800	0,105550	0,0252900	0,161420
-0,0312000	-0,0553400	-0,000306549	-0,0661000	0,0704300	0,107830	0,0219000	0,163940
-0,0473500	-0,0416500	-0,00371000	-0,0438400	0,0770600	0,0831600	0,0318400	0,121230
-0,0459700	-0,0427300	-0,00349000	-0,0438900	0,0766100	0,0851700	0,0322400	0,123080
-0,0385500	-0,0525600	-0,00338000	-0,0400100	0,0737000	0,0973500	0,0346100	0,123530
-0,0356300	-0,0558900	-0,00300000	-0,0393700	0,0730100	0,102730	0,0358200	0,126420

Référence des spectres	Température T (K)	Incertitude sur T (K)	Taille de grains D (μm)	Incertitude sur D (μm)
20100219/Spectre 5	124,493	12,3000	271,840	92,4700
20100219/Spectre 6	138,885	15,2000	271,840	92,4700
20100219/Spectre 7	153,277	18,2000	271,840	92,4700
20100219/Spectre 9	167,669	21,4000	271,840	92,4700
20100219/Spectre 10	182,061	24,2000	271,840	92,4700
20100219/Spectre 11	196,453	22,8000	271,840	92,4700
20100219/Spectre 14	76,4000	2,12000	271,840	92,4700
20100219/Spectre 15	81,3176	3,80000	271,840	92,4700
20100219/Spectre 16	95,7095	6,40000	271,840	92,4700
20100219/Spectre 17	110,101	9,30000	271,840	92,4700
20100219/Spectre 18	124,493	12,2000	271,840	92,4700
20100219/Spectre 19	138,885	15,2000	271,840	92,4700

Position des bandes				Aire des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
1,48030	1,54607	1,64380	1,65162	-0,434950	-0,499590	-0,0637300	-0,288150
1,47930	1,54406	1,64233	1,65047	-0,416190	-0,486260	-0,0541700	-0,276900
1,47881	1,54323	1,64136	1,64966	-0,403230	-0,464470	-0,0478400	-0,263950
1,47257	1,53428	1,64140	1,63916	-0,404830	-0,470220	-0,0282800	-0,331110
1,46821	1,52875	1,64019	1,63394	-0,410620	-0,479420	-0,0173600	-0,365660
1,46594	1,52557	1,63968	1,62962	-0,411220	-0,474950	-0,0136300	-0,378570
1,48710	1,55454	1,64778	1,64852	-0,562650	-0,525940	-0,107000	-0,343190
1,48592	1,55322	1,64724	1,64999	-0,539800	-0,534550	-0,101820	-0,334660
1,48369	1,55035	1,64598	1,65162	-0,502200	-0,543630	-0,0903000	-0,322010
1,48188	1,54761	1,64486	1,65258	-0,467070	-0,547070	-0,0790800	-0,310280
1,48063	1,54498	1,64366	1,65037	-0,462940	-0,549900	-0,0684400	-0,315060
1,47980	1,54295	1,64240	1,64779	-0,440290	-0,517080	-0,0567100	-0,302250

Profondeur des bandes				Largeur des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
-0,0334200	-0,0556700	-0,00248000	-0,0406900	0,0721800	0,104680	0,0365700	0,132650
-0,0318800	-0,0548400	-0,00215000	-0,0398700	0,0719700	0,105960	0,0372600	0,135270
-0,0312400	-0,0524700	-0,00196000	-0,0386300	0,0727800	0,106120	0,0385800	0,137470
-0,0308800	-0,0534700	-0,000907475	-0,0536700	0,0716700	0,106820	0,0301400	0,152270
-0,0309500	-0,0547700	-0,000448437	-0,0620800	0,0708000	0,107330	0,0242700	0,159500
-0,0307100	-0,0539900	-0,000308128	-0,0667600	0,0701500	0,106790	0,0212400	0,165680
-0,0437600	-0,0501200	-0,00376000	-0,0451400	0,0730600	0,0895300	0,0330100	0,123550
-0,0415900	-0,0528700	-0,00365000	-0,0442200	0,0723800	0,0929200	0,0336600	0,124140
-0,0381600	-0,0570700	-0,00335000	-0,0433800	0,0713800	0,0986200	0,0348600	0,126550
-0,0350200	-0,0602200	-0,00303000	-0,0425200	0,0704500	0,103400	0,0359700	0,128730
-0,0344500	-0,0610400	-0,00263000	-0,0445700	0,0699200	0,104280	0,0361100	0,132890
-0,0327700	-0,0572400	-0,00221000	-0,0441900	0,0699200	0,103990	0,0366100	0,137340

Référence des spectres	Température T (K)	Incertitude sur T (K)	Taille de grains D (μm)	Incertitude sur D (μm)
20100219/Spectre 20	153,277	18,4000	271,840	92,4700
20100219/Spectre 21	167,669	21,2000	271,840	92,4700
20100219/Spectre 22	182,061	24,1000	271,840	92,4700
20100219/Spectre 23	196,453	22,6000	271,840	92,4700
20100219/Spectre 26	76,5000	2,15000	271,840	92,4700
20100219/Spectre 27	81,3176	3,20000	271,840	92,4700
20100219/Spectre 28	95,7095	6,50000	271,840	92,4700
20100219/Spectre 29	110,101	9,40000	271,840	92,4700
20100219/Spectre 30	124,493	12,3000	271,840	92,4700
20100219/Spectre 31	138,885	15,2000	271,840	92,4700
20100219/Spectre 32	153,277	18,2000	271,840	92,4700
20100219/Spectre 33	167,669	21,2000	271,840	92,4700

Position des bandes				Aire des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
1,47980	1,54310	1,64093	1,64830	-0,417140	-0,477240	-0,0502200	-0,269440
1,47566	1,53757	1,64047	1,64189	-0,401800	-0,460620	-0,0339200	-0,295890
1,46921	1,52907	1,64014	1,63262	-0,392270	-0,450310	-0,0164100	-0,343090
1,46504	1,52430	1,63933	1,62813	-0,415130	-0,475390	-0,00999000	-0,389750
1,48672	1,55568	1,64821	1,65023	-0,527690	-0,488160	-0,0990300	-0,317670
1,48563	1,55437	1,64773	1,65085	-0,513900	-0,493200	-0,0946000	-0,313430
1,48284	1,55127	1,64617	1,65479	-0,463970	-0,511820	-0,0843300	-0,292210
1,48093	1,54748	1,64494	1,65264	-0,437250	-0,501730	-0,0692600	-0,290310
1,47937	1,54428	1,64341	1,65023	-0,431050	-0,505070	-0,0582100	-0,296210
1,47855	1,54253	1,64221	1,64793	-0,412740	-0,477130	-0,0484400	-0,284220
1,47708	1,53997	1,64140	1,64480	-0,394460	-0,453500	-0,0389700	-0,281480
1,47369	1,53530	1,64082	1,63970	-0,409060	-0,471450	-0,0296800	-0,322010

Profondeur des bandes				Largeur des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
-0,0316000	-0,0528800	-0,00208000	-0,0396000	0,0711600	0,104090	0,0389600	0,138080
-0,0307200	-0,0518300	-0,00126000	-0,0466200	0,0718200	0,105710	0,0347600	0,148020
-0,0295100	-0,0508700	-0,000437174	-0,0585600	0,0706700	0,106130	0,0250200	0,160330
-0,0306500	-0,0538400	-0,000205242	-0,0695600	0,0693600	0,106400	0,0193100	0,167670
-0,0423100	-0,0471800	-0,00352000	-0,0412300	0,0753300	0,0908000	0,0333500	0,121930
-0,0408900	-0,0489700	-0,00339000	-0,0410900	0,0747400	0,0932800	0,0336500	0,123150
-0,0361900	-0,0555400	-0,00319000	-0,0384100	0,0732800	0,101940	0,0355100	0,123500
-0,0336100	-0,0556800	-0,00263000	-0,0400900	0,0722100	0,104260	0,0357300	0,129740
-0,0328800	-0,0567500	-0,00224000	-0,0424800	0,0716500	0,105550	0,0361300	0,134710
-0,0315200	-0,0535000	-0,00188000	-0,0419000	0,0717400	0,105330	0,0364000	0,138510
-0,0301900	-0,0509200	-0,00146000	-0,0428000	0,0719000	0,105490	0,0351100	0,142850
-0,0311700	-0,0532300	-0,00101000	-0,0516800	0,0715900	0,106060	0,0318300	0,150780

Référence des spectres	Température T (K)	Incertitude sur T (K)	Taille de grains D (μm)	Incertitude sur D (μm)
20100223/Spectre 1	76,9000	2,27000	78,0900	29,0600
20100223/Spectre 2	81,3176	3,60000	78,0900	29,0600
20100223/Spectre 3	95,7095	6,50000	78,0900	29,0600
20100223/Spectre 4	110,101	9,50000	78,0900	29,0600
20100223/Spectre 5	124,493	12,4000	78,0900	29,0600
20100223/Spectre 6	138,885	15,2000	78,0900	29,0600
20100223/Spectre 7	153,277	18,2000	78,0900	29,0600
20100223/Spectre 8	167,669	21,1000	78,0900	29,0600
20100223/Spectre 9	182,061	24,1000	78,0900	29,0600
20100223/Spectre 10	196,453	22,7000	78,0900	29,0600
20100223/Spectre 13	76,5000	2,15000	78,0900	29,0600
20100223/Spectre 14	81,3176	3,70000	78,0900	29,0600

Position des bandes				Aire des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
1,49458	1,56061	1,64874	1,63879	-0,559500	-0,349900	-0,0848700	-0,318770
1,49399	1,55991	1,64828	1,63852	-0,556200	-0,348460	-0,0795600	-0,318120
1,49138	1,55697	1,64647	1,63804	-0,535350	-0,350420	-0,0653300	-0,309270
1,48846	1,55364	1,64477	1,63834	-0,508190	-0,359790	-0,0557000	-0,296620
1,48421	1,54997	1,64273	1,64828	-0,443370	-0,420940	-0,0589400	-0,257480
1,48188	1,54730	1,64152	1,65258	-0,395770	-0,430880	-0,0554700	-0,233560
1,47926	1,54397	1,64077	1,65101	-0,376020	-0,431160	-0,0457300	-0,239280
1,47503	1,53726	1,64047	1,64195	-0,389070	-0,446130	-0,0313500	-0,292350
1,47129	1,53207	1,64011	1,63601	-0,401790	-0,461110	-0,0227800	-0,334060
1,46871	1,52915	1,63975	1,63387	-0,401290	-0,469340	-0,0180200	-0,347410
1,49307	1,55913	1,64841	1,64035	-0,570100	-0,387290	-0,0886100	-0,329260
1,49232	1,55822	1,64781	1,63984	-0,564250	-0,382780	-0,0818000	-0,328000

Profondeur des bandes				Largeur des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
-0,0470500	-0,0264000	-0,00267000	-0,0439800	0,0790000	0,0708800	0,0296000	0,129600
-0,0466600	-0,0265300	-0,00251000	-0,0444100	0,0788100	0,0715200	0,0296300	0,131150
-0,0441500	-0,0280500	-0,00212000	-0,0448100	0,0774700	0,0752000	0,0305200	0,136130
-0,0411600	-0,0307800	-0,00191000	-0,0443100	0,0760800	0,0803700	0,0322400	0,140350
-0,0348900	-0,0424900	-0,00237000	-0,0367200	0,0739300	0,0948400	0,0377300	0,133960
-0,0307300	-0,0471100	-0,00242000	-0,0331500	0,0729500	0,102710	0,0410500	0,133350
-0,0292400	-0,0488100	-0,00195000	-0,0347700	0,0730600	0,106360	0,0400700	0,136530
-0,0300500	-0,0504000	-0,00115000	-0,0462000	0,0725700	0,106140	0,0343500	0,148450
-0,0307800	-0,0522800	-0,000700947	-0,0558100	0,0719800	0,106510	0,0289100	0,156960
-0,0308800	-0,0541800	-0,000512935	-0,0593900	0,0723000	0,108440	0,0267500	0,160600
-0,0469300	-0,0305900	-0,00285000	-0,0452000	0,0773300	0,0741900	0,0302200	0,128960
-0,0463300	-0,0305600	-0,00265000	-0,0459400	0,0771400	0,0749900	0,0304400	0,131590

Référence des spectres	Température T (K)	Incertitude sur T (K)	Taille de grains D (μm)	Incertitude sur D (μm)
20100223/Spectre 15	95,7095	6,50000	78,0900	29,0600
20100223/Spectre 16	110,101	9,40000	78,0900	29,0600
20100223/Spectre 17	124,493	12,2000	78,0900	29,0600
20100223/Spectre 18	138,885	15,4000	78,0900	29,0600
20100223/Spectre 19	153,277	18,2000	78,0900	29,0600
20100223/Spectre 20	167,669	21,5000	78,0900	29,0600
20100223/Spectre 21	182,061	24,2000	78,0900	29,0600
20100223/Spectre 22	196,453	22,6000	78,0900	29,0600
20100224/Spectre 1	78,4392	2,60000	637,860	185,290
20100224/Spectre 3	110,101	9,30000	637,860	185,290
20100224/Spectre 4	153,277	18,2000	637,860	185,290
20100224/Spectre 5	182,061	24,2000	637,860	185,290

Position des bandes				Aire des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
1,48579	1,55404	1,64546	1,65761	-0,456250	-0,490140	-0,0943200	-0,258560
1,48547	1,55102	1,64407	1,64582	-0,484600	-0,435430	-0,0656100	-0,287880
1,48273	1,54827	1,64241	1,65242	-0,433300	-0,469090	-0,0649000	-0,258440
1,48158	1,54627	1,64105	1,65201	-0,392880	-0,436590	-0,0546000	-0,235090
1,48015	1,54502	1,64003	1,65307	-0,373140	-0,430080	-0,0500100	-0,225010
1,47641	1,53911	1,64000	1,64445	-0,368410	-0,423100	-0,0340000	-0,259690
1,47115	1,53195	1,63954	1,63623	-0,389740	-0,451070	-0,0211200	-0,321970
1,46780	1,52745	1,63916	1,63073	-0,402090	-0,462090	-0,0143400	-0,359280
1,47766	1,54866	1,64955	1,65669	-0,442630	-0,572400	-0,0833400	-0,340560
1,47458	1,53900	1,64647	1,64553	-0,425250	-0,521400	-0,0468600	-0,365880
1,47291	1,53455	1,64148	1,63918	-0,394970	-0,455390	-0,0271100	-0,319560
1,46975	1,52979	1,63980	1,63303	-0,398630	-0,453140	-0,0166400	-0,338570

Profondeur des bandes				Largeur des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
-0,0354800	-0,0519500	-0,00383000	-0,0331700	0,0730600	0,0995600	0,0381300	0,120510
-0,0379800	-0,0420700	-0,00248000	-0,0412100	0,0736400	0,0907700	0,0354500	0,134490
-0,0333700	-0,0504700	-0,00273000	-0,0361500	0,0723400	0,101080	0,0395000	0,131410
-0,0301600	-0,0479300	-0,00241000	-0,0335600	0,0721200	0,103130	0,0414600	0,134100
-0,0288200	-0,0485200	-0,00229000	-0,0322200	0,0725500	0,105980	0,0430400	0,134540
-0,0285500	-0,0479800	-0,00134000	-0,0401700	0,0728100	0,106530	0,0370900	0,145310
-0,0298700	-0,0513000	-0,000654496	-0,0534000	0,0719900	0,106840	0,0291100	0,155820
-0,0302300	-0,0522100	-0,000357829	-0,0624700	0,0706400	0,106140	0,0234400	0,163340
-0,0337600	-0,0687800	-0,00284000	-0,0426200	0,0716600	0,112880	0,0319900	0,117580
-0,0313000	-0,0596300	-0,00142000	-0,0537900	0,0691500	0,107440	0,0284400	0,138110
-0,0301800	-0,0515000	-0,000864067	-0,0515900	0,0717700	0,106240	0,0299400	0,151660
-0,0299900	-0,0510400	-0,000461836	-0,0574000	0,0706800	0,105820	0,0260700	0,159260

Référence des spectres	Température T (K)	Incertitude sur T (K)	Taille de grains D (μm)	Incertitude sur D (μm)
20100224/Spectre 7	76,3000	1,99000	637,860	185,290
20100224/Spectre 8	81,3176	3,70000	637,860	185,290
20100224/Spectre 9	95,7095	6,40000	637,860	185,290
20100224/Spectre 10	110,101	9,30000	637,860	185,290
20100224/Spectre 11	124,493	12,3000	637,860	185,290
20100224/Spectre 12	138,885	15,3000	637,860	185,290
20100224/Spectre 13	153,277	18,2000	637,860	185,290
20100224/Spectre 14	167,669	21,2000	637,860	185,290
20100224/Spectre 15	182,061	24,2000	637,860	185,290
20100224/Spectre 16	196,453	22,6000	637,860	185,290
20100224/Spectre 19	76,7000	2,21000	637,860	185,290
20100224/Spectre 20	81,3176	3,80000	637,860	185,290

Position des bandes				Aire des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
1,47895	1,54999	1,64992	1,65676	-0,447480	-0,563900	-0,0919900	-0,336410
1,47834	1,54887	1,64947	1,65611	-0,442970	-0,559960	-0,0861500	-0,338100
1,47682	1,54565	1,64818	1,65399	-0,431920	-0,549200	-0,0714700	-0,342450
1,47554	1,54203	1,64682	1,64951	-0,426840	-0,528460	-0,0556800	-0,352750
1,47404	1,53867	1,64571	1,64601	-0,417300	-0,514920	-0,0437800	-0,356360
1,47316	1,53681	1,64424	1,64404	-0,433460	-0,533970	-0,0393000	-0,370680
1,47244	1,53466	1,64299	1,64046	-0,417900	-0,499600	-0,0312700	-0,359830
1,47221	1,53364	1,64185	1,63800	-0,405450	-0,471280	-0,0268500	-0,343190
1,46936	1,52968	1,64135	1,63427	-0,375110	-0,434070	-0,0166700	-0,331830
1,46582	1,52517	1,63956	1,62901	-0,397630	-0,454570	-0,0102200	-0,369220
1,47610	1,54701	1,65123	1,65580	-0,411660	-0,548750	-0,0750700	-0,343530
1,47563	1,54523	1,65060	1,65352	-0,412780	-0,538750	-0,0668000	-0,353100

Profondeur des bandes				Largeur des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
-0,0344000	-0,0664100	-0,00318000	-0,0421100	0,0722200	0,110640	0,0324700	0,117580
-0,0339400	-0,0660500	-0,00296000	-0,0430900	0,0719800	0,110810	0,0323000	0,119740
-0,0329100	-0,0650700	-0,00242000	-0,0459300	0,0715900	0,111300	0,0318700	0,126000
-0,0320700	-0,0612300	-0,00182000	-0,0500800	0,0705900	0,108850	0,0306700	0,133360
-0,0311800	-0,0595300	-0,00137000	-0,0528500	0,0701800	0,108610	0,0294700	0,139310
-0,0323200	-0,0617300	-0,00121000	-0,0563800	0,0700600	0,108610	0,0288800	0,142890
-0,0310100	-0,0569200	-0,000946290	-0,0568000	0,0697000	0,107040	0,0284300	0,148280
-0,0302400	-0,0530300	-0,000787557	-0,0554600	0,0700700	0,105700	0,0275500	0,151830
-0,0282600	-0,0492700	-0,000447313	-0,0561800	0,0707900	0,106630	0,0252100	0,159050
-0,0294000	-0,0513100	-0,000211343	-0,0653200	0,0694600	0,106040	0,0194200	0,166190
-0,0309700	-0,0671300	-0,00248000	-0,0431500	0,0706700	0,114920	0,0310100	0,117990
-0,0307600	-0,0645000	-0,00210000	-0,0454600	0,0700000	0,112470	0,0296000	0,120960

Référence des spectres	Température T (K)	Incertitude sur T (K)	Taille de grains D (μm)	Incertitude sur D (μm)
20100224/Spectre 21	95,7095	6,40000	637,860	185,290
20100224/Spectre 22	110,101	9,20000	637,860	185,290
20100224/Spectre 23	124,493	12,1000	637,860	185,290
20100224/Spectre 24	138,885	15,3000	637,860	185,290
20100224/Spectre 25	153,277	18,2000	637,860	185,290
20100224/Spectre 26	167,669	21,2000	637,860	185,290
20100224/Spectre 27	182,061	24,2000	637,860	185,290
20100224/Spectre 28	196,453	22,7000	637,860	185,290
20100226/Spectre 1	77,2878	2,26000	211,650	68,6300
20100226/Spectre 2	81,3176	3,50000	211,650	68,6300
20100226/Spectre 3	95,7095	6,60000	211,650	68,6300
20100226/Spectre 4	110,101	9,30000	211,650	68,6300

Position des bandes				Aire des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
1,47388	1,54075	1,64913	1,64997	-0,400460	-0,518360	-0,0525500	-0,359980
1,47243	1,53767	1,64718	1,64672	-0,396730	-0,502470	-0,0393100	-0,362330
1,47077	1,53326	1,64605	1,64063	-0,387890	-0,470970	-0,0294900	-0,366160
1,46952	1,53064	1,64459	1,63752	-0,392910	-0,476340	-0,0227300	-0,374640
1,46957	1,53006	1,64309	1,63513	-0,394590	-0,464310	-0,0208800	-0,367140
1,47186	1,53321	1,64123	1,63759	-0,389080	-0,448380	-0,0240300	-0,321300
1,46661	1,52685	1,64126	1,63239	-0,400950	-0,468650	-0,0138000	-0,367030
1,46375	1,52272	1,63935	1,62765	-0,407720	-0,470390	-0,00799000	-0,395210
1,48034	1,54917	1,64757	1,65537	-0,469370	-0,562700	-0,0867800	-0,330170
1,47980	1,54772	1,64720	1,65380	-0,461960	-0,553880	-0,0792300	-0,332820
1,47806	1,54377	1,64582	1,64987	-0,448720	-0,535480	-0,0620500	-0,338210
1,47649	1,54011	1,64424	1,64546	-0,437800	-0,518980	-0,0472900	-0,342470

Profondeur des bandes				Largeur des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
-0,0295700	-0,0616700	-0,00161000	-0,0501300	0,0693800	0,111760	0,0288100	0,130830
-0,0290300	-0,0589400	-0,00112000	-0,0526500	0,0687300	0,110200	0,0267300	0,136510
-0,0279800	-0,0539900	-0,000760505	-0,0572700	0,0677700	0,107690	0,0242200	0,146940
-0,0282000	-0,0545400	-0,000570695	-0,0606200	0,0674200	0,107560	0,0235800	0,152020
-0,0284100	-0,0525000	-0,000532113	-0,0607800	0,0676400	0,106220	0,0239500	0,155520
-0,0295100	-0,0506400	-0,000738987	-0,0525300	0,0712500	0,106100	0,0288900	0,153580
-0,0299400	-0,0537800	-0,000310122	-0,0629300	0,0701600	0,107800	0,0211100	0,161070
-0,0299500	-0,0538600	-0,000150432	-0,0714800	0,0690000	0,107560	0,0176800	0,169920
-0,0362000	-0,0640200	-0,00313000	-0,0432200	0,0724600	0,106890	0,0339100	0,122960
-0,0354100	-0,0627800	-0,00280000	-0,0443300	0,0720000	0,106480	0,0332100	0,125130
-0,0340900	-0,0606400	-0,00215000	-0,0480600	0,0713700	0,106380	0,0325100	0,133490
-0,0328600	-0,0582600	-0,00158000	-0,0508900	0,0705100	0,105460	0,0314600	0,139600

Référence des spectres	Température T (K)	Incertitude sur T (K)	Taille de grains D (μm)	Incertitude sur D (μm)
20100226/Spectre 5	124,493	12,2000	211,650	68,6300
20100226/Spectre 6	138,885	15,4000	211,650	68,6300
20100226/Spectre 7	153,277	18,2000	211,650	68,6300
20100226/Spectre 8	167,669	21,4000	211,650	68,6300
20100226/Spectre 9	182,061	24,2000	211,650	68,6300
20100226/Spectre 10	196,453	22,7000	211,650	68,6300
20100226/Spectre 13	78,0074	2,51000	211,650	68,6300
20100226/Spectre 14	81,3176	3,70000	211,650	68,6300
20100226/Spectre 18	95,7095	6,70000	211,650	68,6300
20100226/Spectre 19	110,101	9,40000	211,650	68,6300
20100226/Spectre 20	124,493	12,2000	211,650	68,6300
20100226/Spectre 21	138,885	15,3000	211,650	68,6300

Position des bandes				Aire des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
1,47503	1,53744	1,64281	1,64264	-0,422140	-0,496820	-0,0364500	-0,335860
1,47284	1,53434	1,64171	1,63947	-0,415940	-0,489370	-0,0283600	-0,344710
1,46989	1,53046	1,64114	1,63540	-0,416300	-0,487360	-0,0212200	-0,366800
1,46706	1,52646	1,64149	1,63032	-0,423310	-0,487120	-0,0135500	-0,395140
1,46598	1,52562	1,63997	1,63017	-0,421110	-0,487310	-0,0118300	-0,391070
1,46473	1,52435	1,63878	1,62868	-0,417170	-0,476120	-0,0106700	-0,387980
1,48556	1,55611	1,64901	1,67421	-0,389090	-0,585910	-0,162200	-0,214900
1,49328	1,55982	1,64915	1,64102	-0,600160	-0,412040	-0,102320	-0,344320
1,48984	1,55607	1,64731	1,64254	-0,563860	-0,430260	-0,0858700	-0,329770
1,48679	1,55281	1,64551	1,64467	-0,526980	-0,448050	-0,0747500	-0,312830
1,48333	1,54905	1,64379	1,65029	-0,464810	-0,482290	-0,0696400	-0,283270
1,48118	1,54589	1,64226	1,65156	-0,425960	-0,483720	-0,0602600	-0,266040

Profondeur des bandes				Largeur des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
-0,0317700	-0,0560300	-0,00121000	-0,0518100	0,0706900	0,105950	0,0311000	0,144920
-0,0312800	-0,0553900	-0,000869036	-0,0550000	0,0706600	0,106330	0,0287900	0,149890
-0,0311400	-0,0553200	-0,000599985	-0,0613300	0,0702600	0,106630	0,0265600	0,157070
-0,0311100	-0,0546600	-0,000293041	-0,0686900	0,0690400	0,105410	0,0203200	0,163300
-0,0314100	-0,0556200	-0,000277311	-0,0687000	0,0700800	0,107230	0,0220300	0,165030
-0,0310100	-0,0540700	-0,000213325	-0,0692900	0,0698400	0,106690	0,0187800	0,167770
-0,0285000	-0,0760700	-0,00660000	-0,0222300	0,0688200	0,121960	0,0382100	0,0972000
-0,0496900	-0,0325600	-0,00331000	-0,0464700	0,0777800	0,0742400	0,0304100	0,126780
-0,0453600	-0,0369200	-0,00289000	-0,0458500	0,0755800	0,0806000	0,0316700	0,130620
-0,0416900	-0,0416000	-0,00266000	-0,0441700	0,0743100	0,0872200	0,0334000	0,132650
-0,0358500	-0,0503600	-0,00272000	-0,0396900	0,0724600	0,0981000	0,0367200	0,131630
-0,0325700	-0,0534700	-0,00252000	-0,0379200	0,0718300	0,103840	0,0392200	0,133890

Référence des spectres	Température T (K)	Incertitude sur T (K)	Taille de grains D (μm)	Incertitude sur D (μm)
20100226/Spectre 22	153,277	18,2000	211,650	68,6300
20100226/Spectre 23	167,669	21,2000	211,650	68,6300
20100226/Spectre 24	182,061	24,1000	211,650	68,6300
20100226/Spectre 25	196,453	22,7000	211,650	68,6300
20100412/Spectre 1	77,6000	0,100000	786,360	221,620
20100412/Spectre 2	80,0000	0,500000	786,360	221,620
20100412/Spectre 4	90,0000	0,400000	786,360	221,620
20100412/Spectre 5	100,000	0,500000	786,360	221,620
20100412/Spectre 6	110,000	0,500000	786,360	221,620
20100412/Spectre 7	120,000	0,400000	786,360	221,620
20100412/Spectre 8	130,000	0,400000	786,360	221,620
20100412/Spectre 9	140,000	0,200000	786,360	221,620

Position des bandes				Aire des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
1,47905	1,54273	1,64092	1,64854	-0,402720	-0,462350	-0,0472600	-0,264860
1,47438	1,53619	1,64063	1,64100	-0,394000	-0,455950	-0,0304700	-0,302810
1,46827	1,52795	1,63986	1,63164	-0,401290	-0,462310	-0,0149700	-0,360550
1,46585	1,52529	1,63858	1,62911	-0,410110	-0,473000	-0,0111000	-0,378050
1,47131	1,53683	1,64905	1,64637	-0,305030	-0,382600	-0,0311400	-0,282080
1,47138	1,53699	1,64875	1,64615	-0,305910	-0,379340	-0,0313900	-0,279590
1,47041	1,53441	1,64793	1,64304	-0,295330	-0,361700	-0,0257200	-0,276530
1,46987	1,53325	1,64695	1,64164	-0,292020	-0,354320	-0,0217100	-0,274390
1,46930	1,53281	1,64620	1,64280	-0,286010	-0,357890	-0,0210600	-0,269810
1,46899	1,53197	1,64599	1,64088	-0,284440	-0,346350	-0,0193700	-0,268780
1,46878	1,53088	1,64647	1,63881	-0,281910	-0,335520	-0,0173300	-0,269590
1,46877	1,53134	1,64569	1,63976	-0,275130	-0,330670	-0,0168800	-0,259630

Profondeur des bandes				Largeur des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
-0,0308700	-0,0517100	-0,00194000	-0,0391400	0,0720200	0,105080	0,0386100	0,138830
-0,0302300	-0,0516100	-0,00107000	-0,0482300	0,0720800	0,106340	0,0330300	0,149630
-0,0300100	-0,0521900	-0,000371403	-0,0622800	0,0702600	0,106040	0,0233100	0,162280
-0,0305500	-0,0537800	-0,000241684	-0,0666600	0,0699900	0,106800	0,0204500	0,165650
-0,0227100	-0,0448200	-0,000888910	-0,0414400	0,0699400	0,110040	0,0268100	0,138010
-0,0227000	-0,0441600	-0,000877658	-0,0411100	0,0697200	0,109360	0,0262700	0,138140
-0,0217400	-0,0415800	-0,000678064	-0,0422000	0,0691400	0,107990	0,0247700	0,143380
-0,0214700	-0,0406900	-0,000548750	-0,0424300	0,0690700	0,107880	0,0237500	0,145260
-0,0211500	-0,0419900	-0,000566129	-0,0419300	0,0694500	0,110220	0,0252600	0,145980
-0,0209800	-0,0401100	-0,000497796	-0,0425700	0,0693000	0,108790	0,0241500	0,148790
-0,0205900	-0,0383000	-0,000445401	-0,0436300	0,0686200	0,107240	0,0241400	0,152020
-0,0201800	-0,0379900	-0,000422630	-0,0414400	0,0689200	0,107930	0,0235300	0,149950

Référence des spectres	Température T (K)	Incertitude sur T (K)	Taille de grains D (μm)	Incertitude sur D (μm)
20100412/Spectre 10	150,000	0,200000	786,360	221,620
20100412/Spectre 11	160,000	0,100000	786,360	221,620
20100412/Spectre 12	170,000	0,100000	786,360	221,620
20100412/Spectre 15	77,7000	0,200000	786,360	221,620
20100412/Spectre 17	80,0000	0,500000	786,360	221,620
20100412/Spectre 18	90,0000	0,500000	786,360	221,620
20100412/Spectre 19	100,000	0,300000	786,360	221,620
20100412/Spectre 20	110,000	0,300000	786,360	221,620
20100412/Spectre 21	120,000	0,600000	786,360	221,620
20100412/Spectre 22	130,000	0,400000	786,360	221,620
20100412/Spectre 23	140,000	0,300000	786,360	221,620
20100412/Spectre 25	150,000	0,300000	786,360	221,620

Position des bandes				Aire des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
1,46820	1,52988	1,64506	1,63777	-0,266140	-0,316740	-0,0146600	-0,255840
1,46765	1,52900	1,64549	1,63718	-0,263470	-0,314670	-0,0141200	-0,254370
1,46684	1,52738	1,64460	1,63445	-0,301980	-0,353870	-0,0122100	-0,294550
1,46650	1,52854	1,64786	1,63959	-0,433430	-0,539880	-0,0233700	-0,435870
1,46763	1,53099	1,64871	1,64213	-0,441430	-0,552680	-0,0277100	-0,436330
1,46723	1,52951	1,64838	1,63911	-0,447550	-0,538100	-0,0225100	-0,445190
1,46670	1,52895	1,64796	1,63903	-0,442220	-0,535550	-0,0215000	-0,438800
1,46620	1,52767	1,64747	1,63767	-0,439580	-0,531180	-0,0190400	-0,440790
1,46563	1,52676	1,64696	1,63658	-0,434940	-0,524820	-0,0163400	-0,437000
1,46524	1,52539	1,64621	1,63385	-0,434940	-0,505730	-0,0143500	-0,441090
1,46485	1,52513	1,64604	1,63440	-0,429250	-0,509440	-0,0126800	-0,435090
1,46455	1,52449	1,64568	1,63334	-0,419280	-0,496820	-0,0121800	-0,425350

Profondeur des bandes				Largeur des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
-0,0193600	-0,0361100	-0,000362800	-0,0418000	0,0683500	0,107080	0,0232500	0,153490
-0,0191900	-0,0360400	-0,000334118	-0,0419100	0,0684100	0,107600	0,0222300	0,154780
-0,0216300	-0,0399200	-0,000254843	-0,0493800	0,0672800	0,105980	0,0196100	0,157480
-0,0307200	-0,0635600	-0,000515952	-0,0695500	0,0665900	0,110600	0,0207400	0,149910
-0,0315400	-0,0653100	-0,000650387	-0,0673700	0,0671200	0,111020	0,0220500	0,145050
-0,0315600	-0,0618200	-0,000497145	-0,0707000	0,0662400	0,107930	0,0207500	0,149200
-0,0312500	-0,0621900	-0,000449104	-0,0701300	0,0663800	0,109090	0,0196200	0,150140
-0,0310200	-0,0616800	-0,000404900	-0,0717900	0,0662900	0,109090	0,0199700	0,153010
-0,0306600	-0,0609200	-0,000324421	-0,0718300	0,0662100	0,109050	0,0186500	0,154410
-0,0304200	-0,0576600	-0,000282598	-0,0748700	0,0657100	0,107110	0,0185000	0,159450
-0,0301200	-0,0588100	-0,000240385	-0,0737100	0,0659300	0,108450	0,0178100	0,159160
-0,0294600	-0,0574900	-0,000214018	-0,0728300	0,0660200	0,108700	0,0165100	0,160860

Référence des spectres	Température T (K)	Incertitude sur T (K)	Taille de grains D (μm)	Incertitude sur D (μm)
20100412/Spectre 26	160,000	0,200000	786,360	221,620
20100412/Spectre 27	170,000	0,200000	786,360	221,620
20100412/Spectre 29	180,000	0,300000	786,360	221,620
20100414/Spectre 1	77,8000	0,200000	637,860	185,290
20100414/Spectre 2	80,0000	0,800000	637,860	185,290
20100414/Spectre 3	90,0000	0,600000	637,860	185,290
20100414/Spectre 4	100,000	0,500000	637,860	185,290
20100414/Spectre 5	110,000	0,600000	637,860	185,290
20100414/Spectre 6	120,000	0,500000	637,860	185,290
20100414/Spectre 7	130,000	0,500000	637,860	185,290
20100414/Spectre 8	140,000	0,600000	637,860	185,290
20100414/Spectre 9	150,000	0,400000	637,860	185,290

Position des bandes				Aire des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
1,46432	1,52359	1,64500	1,63140	-0,407730	-0,473820	-0,0116800	-0,416030
1,46460	1,52406	1,64398	1,63105	-0,393540	-0,452780	-0,0103300	-0,393060
1,46627	1,52618	1,64226	1,63197	-0,364000	-0,425100	-0,0112000	-0,345540
1,47270	1,53828	1,64693	1,64660	-0,444950	-0,547750	-0,0463500	-0,380940
1,47238	1,53682	1,64688	1,64429	-0,442190	-0,536080	-0,0432700	-0,386330
1,47185	1,53627	1,64616	1,64444	-0,436110	-0,535970	-0,0399300	-0,381570
1,47123	1,53425	1,64607	1,64132	-0,430830	-0,517190	-0,0366200	-0,386130
1,47093	1,53392	1,64513	1,64117	-0,430280	-0,519980	-0,0330000	-0,383700
1,47061	1,53286	1,64485	1,63926	-0,429700	-0,509480	-0,0300600	-0,387050
1,47027	1,53198	1,64465	1,63795	-0,424820	-0,501180	-0,0286000	-0,384930
1,47041	1,53238	1,64422	1,63861	-0,422470	-0,499360	-0,0282200	-0,378905
1,47012	1,53174	1,64395	1,63754	-0,417370	-0,489710	-0,0251200	-0,374410

Profondeur des bandes				Largeur des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
-0,0285000	-0,0541800	-0,000203901	-0,0727900	0,0656700	0,107420	0,0163900	0,164370
-0,0277600	-0,0516700	-0,000171549	-0,0687100	0,0662800	0,107200	0,0156000	0,164230
-0,0263900	-0,0484800	-0,000234645	-0,0595200	0,0681100	0,107130	0,0196800	0,161820
-0,0334400	-0,0637200	-0,00140000	-0,0559200	0,0706100	0,109280	0,0284000	0,137900
-0,0329500	-0,0614800	-0,00126000	-0,0580700	0,0700000	0,107740	0,0274000	0,141200
-0,0325400	-0,0621400	-0,00117000	-0,0576300	0,0701100	0,108920	0,0274100	0,141890
-0,0320100	-0,0592500	-0,00105000	-0,0608000	0,0698100	0,107630	0,0269500	0,147920
-0,0318500	-0,0596600	-0,000927975	-0,0601200	0,0695500	0,107790	0,0264200	0,147200
-0,0317100	-0,0578400	-0,000813047	-0,0619900	0,0693200	0,106650	0,0254100	0,150450
-0,0312100	-0,0567100	-0,000764569	-0,0625100	0,0690300	0,106310	0,0251100	0,152550
-0,0312400	-0,0568200	-0,000769831	-0,0615200	0,0694600	0,106880	0,0256300	0,152530
-0,0307700	-0,0554400	-0,000648751	-0,0607400	0,0692500	0,106350	0,0242600	0,152400

Référence des spectres	Température T (K)	Incertitude sur T (K)	Taille de grains D (μm)	Incertitude sur D (μm)
20100414/Spectre 10	160,000	0,200000	637,860	185,290
20100414/Spectre 12	170,000	0,200000	637,860	185,290
20100414/Spectre 13	180,000	0,200000	637,860	185,290
20100414/Spectre 15	76,6000	0,100000	637,860	185,290
20100414/Spectre 16	80,0000	0,600000	637,860	185,290
20100414/Spectre 17	90,0000	0,700000	637,860	185,290
20100414/Spectre 18	100,000	0,700000	637,860	185,290
20100414/Spectre 19	110,000	0,500000	637,860	185,290
20100414/Spectre 20	120,000	0,700000	637,860	185,290
20100414/Spectre 21	130,000	0,500000	637,860	185,290
20100414/Spectre 22	140,000	0,400000	637,860	185,290
20100414/Spectre 23	150,000	0,300000	637,860	185,290

Position des bandes				Aire des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
1,46910	1,52974	1,64386	1,63493	-0,416820	-0,484500	-0,0217600	-0,383820
1,46907	1,52992	1,64264	1,63560	-0,406300	-0,475320	-0,0206200	-0,369590
1,46908	1,52943	1,64181	1,63410	-0,392300	-0,455580	-0,0189800	-0,351710
1,47360	1,54027	1,65024	1,64862	-0,452590	-0,573690	-0,0600300	-0,405850
1,47353	1,54034	1,65014	1,64886	-0,452680	-0,573370	-0,0585600	-0,404510
1,47261	1,53791	1,64914	1,64625	-0,451370	-0,561690	-0,0497800	-0,412030
1,47180	1,53592	1,64830	1,64408	-0,446080	-0,549940	-0,0432300	-0,414640
1,47116	1,53449	1,64776	1,64243	-0,441190	-0,538340	-0,0373900	-0,413900
1,47041	1,53276	1,64735	1,64035	-0,437060	-0,527950	-0,0332700	-0,416310
1,46985	1,53161	1,64643	1,63901	-0,434110	-0,519390	-0,0296900	-0,416180
1,46942	1,53101	1,64606	1,63850	-0,430010	-0,515890	-0,0263700	-0,410110
1,46917	1,53038	1,64531	1,63740	-0,428920	-0,509360	-0,0245400	-0,408550

Profondeur des bandes				Largeur des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
-0,0303700	-0,0543800	-0,000547356	-0,0640600	0,0684600	0,105450	0,0236300	0,156780
-0,0299800	-0,0540000	-0,000544745	-0,0616900	0,0693300	0,106730	0,0248200	0,156800
-0,0291100	-0,0514500	-0,000490631	-0,0593400	0,0697200	0,106080	0,0242800	0,158510
-0,0329800	-0,0671000	-0,00180000	-0,0562800	0,0684700	0,109870	0,0281000	0,130280
-0,0330700	-0,0672500	-0,00178000	-0,0562400	0,0686300	0,110190	0,0284800	0,130610
-0,0327300	-0,0650700	-0,00142000	-0,0594500	0,0681200	0,108830	0,0267100	0,135540
-0,0320900	-0,0631700	-0,00120000	-0,0616800	0,0675900	0,107920	0,0260500	0,139750
-0,0316600	-0,0615900	-0,00100000	-0,0629500	0,0674100	0,107470	0,0252500	0,142880
-0,0312100	-0,0601000	-0,000851342	-0,0650600	0,0670800	0,106950	0,0240400	0,146820
-0,0309100	-0,0589100	-0,000747978	-0,0665200	0,0669000	0,106560	0,0236700	0,150150
-0,0306000	-0,0586900	-0,000642570	-0,0657100	0,0668500	0,106870	0,0228900	0,150530
-0,0305100	-0,0577000	-0,000584080	-0,0663400	0,0668200	0,106410	0,0223600	0,152550

Référence des spectres	Température T (K)	Incertitude sur T (K)	Taille de grains D (μm)	Incertitude sur D (μm)
20100414/Spectre 24	160,000	0,300000	637,860	185,290
20100414/Spectre 25	170,000	0,200000	637,860	185,290
20100414/Spectre 27	180,000	0,200000	637,860	185,290
20100414/Spectre 29	190,000	0,400000	637,860	185,290

Position des bandes				Aire des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
1,46864	1,52903	1,64482	1,63518	-0,422290	-0,495160	-0,0213000	-0,407100
1,46814	1,52828	1,64365	1,63425	-0,417440	-0,486590	-0,0170500	-0,399490
1,46783	1,52738	1,64249	1,63251	-0,395570	-0,460680	-0,0160200	-0,378310
1,46795	1,52741	1,64125	1,63177	-0,383090	-0,443980	-0,0145300	-0,356140

Profondeur des bandes				Largeur des bandes			
1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)	1,50 μm	1,55 μm	1,65 μm	1,60 μm (large)
-0,0298700	-0,0556400	-0,000501383	-0,0676600	0,0664600	0,105570	0,0221100	0,156130
-0,0294900	-0,0546200	-0,000376794	-0,0668200	0,0663700	0,105450	0,0207600	0,157120
-0,0280700	-0,0515800	-0,000355508	-0,0645100	0,0666500	0,105180	0,0208500	0,160200
-0,0277500	-0,0500100	-0,000345465	-0,0614300	0,0680400	0,105820	0,0223300	0,162040

Liste des paramètres de l'aire de la bande à 1,5 μm (A15) et des aires réduites des bandes à 1,3 μm (Ar13) et 1,5 μm (Ar15) des échantillons macroscopiques de glace d'eau non tamisés.

Référence des spectres	A15 (μm)	A15 normée
20090317/Spectre9	0,1327613	0,889706553
20090317/Spectre10	0,1331453	0,892279948
20090317/Spectre11	0,1333624	0,893734854
20090317/Spectre12	0,1337066	0,896041528
20090317/Spectre13	0,1335161	0,894764883
20090317/Spectre14	0,1333825	0,893869556
20090317/Spectre15	0,1333215	0,893460761
20090317/Spectre23	0,2288493	1,533645134
20090317/Spectre24	0,2281473	1,528940646
20090317/Spectre25	0,2272784	1,523117669
20090317/Spectre26	0,2263958	1,51720288
20090317/Spectre27	0,2252645	1,509621416

Ar13 (μm)	Ar13 normée	Ar15 (μm)	Ar15 normée
0,001727298	1,092898713	0,02855575	0,794600089
0,001909277	1,208040752	0,03012343	0,83822278
0,002056807	1,301386166	0,0316834	0,881630931
0,002210757	1,398793653	0,03323667	0,924852646
0,002376346	1,503565386	0,0349604	0,972817627
0,002560517	1,620094351	0,03631985	1,010646054
0,002759577	1,746043908	0,03820163	1,063008977
0,004197832	2,656058879	0,04960425	1,380301392
0,004590329	2,904400199	0,05183405	1,442348415
0,005099963	3,226856627	0,05356217	1,490435554
0,005399695	3,41650353	0,05585373	1,554201127
0,005855401	3,704838548	0,05863214	1,631513922

Référence des spectres	A15 (μm)	A15 normée
20090317/Spectre28	0,2237497	1,499469907
20090317/Spectre29	0,2228295	1,493303141
20090409/Spectre20	0,191875	1,285859997
20090409/Spectre21	0,1916366	1,284262347
20090409/Spectre22	0,191496	1,283320109
20090409/Spectre23	0,1914795	1,283209533
20090409/Spectre24	0,1904392	1,27623791
20090409/Spectre25	0,1898529	1,272308791
20090409/Spectre26	0,1888228	1,265405524
20090410/Spectre7	0,1934314	1,29629029
20090410/Spectre8	0,1931349	1,29430328
20090410/Spectre9	0,1928896	1,29265939

Ar13 (μm)	Ar13 normée	Ar15 (μm)	Ar15 normée
0,006196507	3,920663674	0,0609815	1,696887854
0,00668322	4,228617491	0,06267803	1,744095961
0,003110889	1,968326591	0,04088628	1,137712781
0,003514714	2,223835381	0,04278384	1,190514803
0,003769464	2,385021203	0,0458532	1,275923651
0,004117856	2,605456338	0,04794443	1,334114788
0,004424896	2,79972717	0,04982056	1,386320493
0,00480379	3,039461579	0,05241739	1,458580593
0,005169687	3,270972506	0,05478481	1,524457068
0,003402092	2,152577012	0,04196814	1,167816912
0,003770127	2,385440697	0,04423424	1,230874029
0,004054709	2,565501868	0,04601593	1,280451821

Référence des spectres	A15 (μm)	A15 normée
20090410/Spectre10	0,1921446	1,287666735
20090410/Spectre11	0,1917116	1,284764963
20090410/Spectre12	0,1909441	1,279621523
20090410/Spectre13	0,1894633	1,269697867
20090410/Spectre20	0,2055104	1,377238318
20090410/Spectre21	0,2061398	1,381456274
20090410/Spectre22	0,2059601	1,380252005
20090410/Spectre23	0,2060657	1,380959689
20090410/Spectre24	0,205681	1,378381602
20090410/Spectre25	0,2045522	1,370816892
20090410/Spectre26	0,2035624	1,364183698
20090414/Spectre7	0,1990622	1,33402538

Ar13 (μm)	Ar13 normée	Ar15 (μm)	Ar15 normée
0,004440057	2,809319862	0,04807153	1,337651507
0,004728978	2,992126413	0,05048197	1,404725068
0,004970222	3,144766697	0,05224588	1,453808109
0,005351929	3,386280951	0,05462263	1,519944203
0,003135226	1,983725136	0,04521603	1,258193585
0,003520615	2,227569071	0,04795586	1,334432842
0,003921234	2,481049356	0,05079431	1,413416326
0,004192016	2,65237897	0,05370394	1,494380484
0,004672674	2,956501657	0,05569253	1,549715532
0,004832487	3,05761879	0,05833652	1,623287919
0,005273146	3,336433247	0,06160697	1,714292353
0,003248583	2,055448555	0,04558047	1,268334592

Référence des spectres	A15 (μm)	A15 normée
20090414/Spectre8	0,1990539	1,333969757
20090414/Spectre9	0,1985202	1,33039314
20090414/Spectre10	0,1981299	1,327777525
20090414/Spectre11	0,1976518	1,324573513
20090414/Spectre12	0,1969022	1,319550031
20090414/Spectre13	0,1956852	1,311394244
20090414/Spectre20	0,1304009	0,873888213
20090414/Spectre21	0,1308183	0,87668544
20090414/Spectre22	0,1306179	0,875342449
20090414/Spectre23	0,1303885	0,873805114
20090414/Spectre24	0,1306015	0,875232544
20090414/Spectre25	0,1302462	0,872851483

Ar13 (μm)	Ar13 normée	Ar15 (μm)	Ar15 normée
0,003495568	2,211721294	0,04747524	1,321058979
0,003890988	2,461912059	0,04942061	1,375191375
0,004150582	2,626162784	0,05122273	1,425337658
0,004555476	2,882347954	0,05381735	1,497536262
0,004748455	3,004449931	0,05647226	1,571412512
0,00516544	3,268285337	0,05896763	1,640849358
0,001636085	1,03518628	0,03028249	0,842648827
0,001716583	1,086119101	0,03194841	0,889005172
0,00176794	1,118613783	0,03368746	0,937396451
0,001973568	1,248719055	0,03536451	0,984062502
0,00219832	1,390924495	0,03698912	1,029269343
0,002315422	1,465017457	0,03850996	1,071588652

Référence des spectres	A15 (μm)	A15 normée
20090414/Spectre26	0,1298971	0,870511972
20090415/Spectre7	0,1891136	1,267354335
20090415/Spectre8	0,189338	1,268858163
20090415/Spectre9	0,1893065	1,268647064
20090415/Spectre10	0,1889888	1,266517982
20090415/Spectre11	0,1885617	1,263655749
20090415/Spectre12	0,1881136	1,260652785
20090415/Spectre13	0,1869043	1,2525486
20090415/Spectre20	0,1780955	1,193515982
20090415/Spectre21	0,1780569	1,193257302
20090415/Spectre22	0,1781441	1,193841677
20090415/Spectre23	0,178174	1,194042054

Ar13 (μm)	Ar13 normée	Ar15 (μm)	Ar15 normée
0,002449407	1,549792657	0,04063493	1,130718647
0,002966501	1,876969188	0,04474775	1,245163098
0,00319319	2,020400209	0,0466822	1,298991632
0,003479764	2,201721762	0,0492669	1,370914199
0,00371893	2,35304725	0,05133873	1,428565506
0,003956304	2,503238902	0,05360193	1,491541926
0,004295834	2,718066858	0,05578557	1,552304488
0,004618166	2,922013269	0,05864601	1,631899872
0,002587909	1,637425861	0,04090922	1,138351115
0,002953196	1,868550827	0,04310082	1,199335175
0,003246713	2,054265366	0,04588844	1,276904249
0,003415702	2,161188352	0,04770106	1,327342708

Référence des spectres	A15 (μm)	A15 normée
20090415/Spectre24	0,1775199	1,189658569
20090415/Spectre25	0,176829	1,185028468
20090415/Spectre26	0,1762716	1,181293024
20090415/Spectre33	0,1836374	1,230655304
20090415/Spectre34	0,1837153	1,231177355
20090415/Spectre35	0,183702	1,231088225
20090415/Spectre36	0,1838446	1,232043866
20090415/Spectre37	0,1842753	1,234930223
20090415/Spectre38	0,1841588	1,234149493
20090415/Spectre39	0,182682	1,224252643
20090415/Spectre46	0,1785006	1,19623078
20090415/Spectre47	0,178621	1,197037647

Ar13 (μm)	Ar13 normée	Ar15 (μm)	Ar15 normée
0,003739763	2,366228739	0,04981461	1,386154927
0,003987224	2,522802653	0,0517708	1,440588403
0,004239941	2,682702151	0,05476986	1,524041065
0,002918521	1,846611207	0,04007594	1,115164039
0,003187701	2,0169272	0,04258046	1,184855495
0,003405031	2,15443658	0,04414517	1,228395543
0,003695454	2,338193479	0,04647524	1,293232706
0,004032374	2,551370032	0,04894572	1,361976957
0,004296698	2,71861353	0,05115198	1,423368949
0,004616243	2,920796546	0,05379631	1,496950797
0,002572584	1,627729403	0,04209501	1,171347231
0,002821805	1,785416907	0,04382156	1,219390683

Référence des spectres	A15 (μm)	A15 normée
20090415/Spectre48	0,1783704	1,195358238
20090415/Spectre49	0,1779856	1,192779481
20090415/Spectre50	0,1775762	1,190035867
20090415/Spectre51	0,1768682	1,185291169
20090415/Spectre52	0,1758329	1,178353054
20090416/Spectre7	0,1959925	1,313453631
20090416/Spectre8	0,2080288	1,394115503
20090416/Spectre9	0,195901	1,312840439
20090416/Spectre10	0,1959177	1,312952355
20090416/Spectre11	0,1956387	1,311082622
20090416/Spectre12	0,1952171	1,308257248
20090416/Spectre13	0,1946777	1,304642432

Ar13 (μm)	Ar13 normée	Ar15 (μm)	Ar15 normée
0,003119416	1,973721808	0,0463604	1,290037137
0,003446364	2,180588861	0,04895475	1,362228228
0,003639986	2,303097678	0,05108075	1,421386884
0,003841824	2,430804936	0,05339094	1,485670861
0,004185317	2,648140368	0,05565742	1,548738552
0,003167968	2,004441705	0,04097703	1,140238015
0,002952809	1,868305964	0,04396336	1,223336448
0,003751194	2,373461379	0,0447361	1,244838922
0,004034689	2,552834782	0,04685239	1,303727385
0,004249863	2,688980015	0,04877277	1,357164403
0,004622672	2,924864313	0,05142611	1,430996965
0,00503915	3,188378929	0,05414118	1,506547244

Référence des spectres	A15 (μm)	A15 normée
20090416/Spectre20	0,1285804	0,86168804
20090416/Spectre21	0,1287868	0,86307124
20090416/Spectre22	0,1290381	0,86475534
20090416/Spectre23	0,1289813	0,864374692
20090416/Spectre24	0,1290361	0,864741937
20090416/Spectre25	0,1289299	0,864030232
20090416/Spectre26	0,1289829	0,864385414
20090424/Spectre1	0,1932669	1,295187885
20090424/Spectre5	0,1945377	1,303704215
20090424/Spectre9	0,1946609	1,304529846
20090424/Spectre13	0,1944333	1,303004573

Ar13 (μm)	Ar13 normée	Ar15 (μm)	Ar15 normée
0,001675436	1,060084506	0,02861434	0,79623043
0,001814583	1,148125815	0,03021142	0,840671214
0,001974926	1,249578291	0,03168882	0,88178175
0,002123756	1,343746243	0,03315994	0,922717536
0,00225081	1,42413605	0,03461677	0,963255685
0,002441563	1,544829589	0,03622015	1,007871774
0,00264544	1,673826966	0,0382698	1,064905894
0,004510657	2,853990006	0,06013884	1,673439767
0,00388262	2,456617445	0,05464087	1,520451754
0,003493343	2,210313488	0,05062809	1,408791043
0,003006266	1,902129361	0,04603284	1,280922363

Liste des paramètres de l'aire de la bande à 1,5 μm (A15) et des aires réduites des bandes à 1,3 μm (Ar13) et 1,5 μm (Ar15) des échantillons macroscopiques de glace d'eau tamisés. Les 47 spectres de référence utilisés pour déterminer la loi (Chapitre III).

Référence des spectres	A15 (μm)	A15 normée
20100223Spectre1	0,135906	0,910780918
20100223Spectre2	0,136161	0,912489814
20100223Spectre3	0,1361855	0,912654002
20100223Spectre4	0,1357312	0,909609487
20100223Spectre5	0,1349243	0,904202006
20100223Spectre6	0,1322586	0,886337683
20100226Spectre13	0,1532206	1,026815584
20100226Spectre14	0,1509217	1,01140939
20100226Spectre18	0,151386	1,01452092
20100226Spectre19	0,1515611	1,015694361
20100226Spectre20	0,1505706	1,009056475
20100226Spectre21	0,1492192	1

Ar13 (μm)	Ar13 normée	Ar15 (μm)	Ar15 normée
0,0021366	1,438497273	0,016095	1,499580732
0,0020825	1,402073655	0,0155229	1,446277835
0,0019038	1,28176126	0,0135414	1,2616603
0,0017027	1,146367737	0,0118068	1,100046585
0,0015659	1,054265132	0,0104019	0,969151216
0,0013827	0,930923046	0,0090612	0,844237399
0,0024403	1,642967751	0,0193378	1,801714339
0,0023476	1,580556117	0,0185794	1,731053759
0,0021067	1,41836666	0,0161779	1,507304575
0,001906	1,283242443	0,0142015	1,32316221
0,0016889	1,137076685	0,0123756	1,15304202
0,0014853	1	0,010733	1

Référence des spectres	A15 (μm)	A15 normée
20100219Spectre26	0,1588259	1,064379785
20100209Spectre1	0,1602948	1,074223692
20100219Spectre27	0,1591238	1,066376177
20100209Spectre4	0,1607776	1,077459201
20100219Spectre28	0,159397	1,06820704
20100209Spectre7	0,1609462	1,078589082
20100209Spectre10	0,1610449	1,079250525
20100219Spectre29	0,1588531	1,064562067
20100209Spectre13	0,1609023	1,078294884
20100219Spectre30	0,1627465	1,090653884
20100209Spectre16	0,160081	1,072790901
20100219Spectre31	0,1568229	1,050956579

Ar13 (μm)	Ar13 normée	Ar15 (μm)	Ar15 normée
0,0026051	1,753921767	0,0174469	1,62553806
0,0021366	1,438497273	0,0194561	1,81273642
0,0025513	1,717700128	0,0167051	1,556424113
0,0017027	1,146367737	0,017778	1,656386844
0,0022945	1,544805763	0,0149309	1,391120842
0,0014445	0,972530802	0,0162627	1,515205441
0,001897	1,277183061	0,0149031	1,3885307
0,0020711	1,394398438	0,0131967	1,229544396
0,0021136	1,423012186	0,0135865	1,265862294
0,0018566	1,249983168	0,0122231	1,138833504
0,0016864	1,135393523	0,0124632	1,161203764
0,001632	1,098767926	0,0107376	1,000428585

Référence des spectres	A15 (μm)	A15 normée
20100209Spectre19	0,158226	1,060359525
20100217Spectre1	0,1796333	1,203821626
20100217Spectre3	0,1795628	1,203349167
20100217Spectre4	0,1786296	1,19709528
20100217Spectre5	0,1792056	1,200955373
20100217Spectre6	0,1797648	1,20470288
20100217Spectre7	0,1859382	1,246074232
20100414Spectre15	0,2040689	1,367578033
20100414Spectre1	0,2024517	1,356740285
20100414Spectre2	0,2023526	1,356076162
20100414Spectre16	0,2049559	1,373522308
20100414Spectre3	0,2023352	1,355959555

Ar13 (μm)	Ar13 normée	Ar15 (μm)	Ar15 normée
0,0012809	0,862384703	0,0113255	1,055203578
0,0034838	2,345519424	0,0193569	1,803493897
0,0034007	2,28957113	0,0188188	1,7533588
0,003171	2,134922238	0,0171654	1,599310538
0,0027726	1,866693597	0,0148232	1,381086369
0,0024827	1,671514172	0,0135598	1,263374639
0,0023	1,548508719	0,0130806	1,21872729
0,0041249	2,777149397	0,0168778	1,572514674
0,0036519	2,458695213	0,0149697	1,394735861
0,0035208	2,370430216	0,0145674	1,357253331
0,00414	2,787315694	0,017043	1,587906457
0,0033558	2,259341547	0,0140084	1,305170968

Référence des spectres	A15 (μm)	A15 normée
20100414Spectre17	0,2061442	1,381485761
20100414Spectre4	0,2017353	1,351939295
20100414Spectre18	0,2072715	1,389040418
20100414Spectre5	0,2014545	1,350057499
20100414Spectre19	0,2077428	1,392198859
20100414Spectre6	0,20152	1,350496451
20100414Spectre20	0,2080827	1,394476716
20100414Spectre7	0,2009557	1,346714766
20100414Spectre21	0,2074547	1,390268142
20100414Spectre8	0,1997815	1,338845805
20100414Spectre22	0,2072015	1,38857131

Ar13 (μm)	Ar13 normée	Ar15 (μm)	Ar15 normée
0,0039157	2,63630243	0,0159266	1,483890804
0,0032192	2,167373595	0,013628	1,269728874
0,0037035	2,49343567	0,0152613	1,421904407
0,00313	2,107318387	0,0134225	1,250582316
0,0034996	2,356157005	0,0147449	1,373791112
0,0029942	2,015889046	0,0130462	1,215522221
0,0032985	2,220763482	0,0142127	1,324205721
0,0028795	1,938665589	0,0125881	1,172840771
0,0031791	2,140375682	0,0137871	1,284552315
0,0028019	1,886420252	0,0125305	1,167474145
0,0029258	1,969837743	0,0132683	1,23621541

Annexe C

Les programmes

Programme en fortran 77 pour déterminer les paramètres X_0, k^i, a_T, k^i, et a_D, k^i pour chaque critère, i, et pour chaque gaussienne, k.

```
program CALCTD
implicit real*8(a-h,o-z)
real*8 Tmes(500),Dmes(500),Xm(500,20)
real*8 STmes(500),SDmes(500)
character*20 filename
c INITIALISATION
npx0=101
npaD=201
npaT=201
j=3
x0min=1.65356d0
x0max=1.66925d0
aTmin=-0.00012289d0
```



```
aTmax=-0.00010959d0
aDmin=0.00015521d0
aDmax=0.00021811d0
dx0=(x0max-x0min)/dble(npx0-1)
daT=(aTmax-aTmin)/dble(npaT-1)
daD=(aDmax-aDmin)/dble(npaD-1)
open(unit=20,file='../FILES/Bollengierdata
& /fitlogfullcont/paramlogfullcont.dat')
rewind(20)
read(20,*) np
do 100 ip=1,np
read(20,*)Tmes(ip),STmes(ip),Dmes(ip),SDmes(ip),
& (Xm(ip,jj),jj=1,20),filename
100 continue
c CALCUL
Xhi2max=1.d55
do 400 ix0=1,npx0
X0=x0min+dble(ix0-1)*dx0
do 300 iD0=1,npaD
aD=aDmin+dble(iD0-1)*daD
do 300 iT0=1,npaT
aT=aTmin+dble(iT0-1)*daT
xhi2=0.d0
do 200 ip=1,np
X=X0+aT*Tmes(ip)+aD*Dmes(ip)**0.5d0
```

```
xhi2=xhi2+(X-Xm(ip,j))**2.d0
200 continue
if (xhi2.lt.xhi2max) then
xhi2max=xhi2
aTref=aT
aDref=aD
x0ref=X0
endif
300 continue
write(*,1000) ix0,x0ref,aTref,aDref,xhi2max
400 continue
do 500 ip=1,np
X=X0+aTref*Tmes(ip)+aDref*Dmes(ip)**0.5d0
500 continue
1000 format(i4,3f15.10,e12.4)
close(20)
stop
end
*******************************************
```


Programme en fortran 77 pour déterminer la valeur de T et D à partir d'un spectre dont les conditions de température et de taille de grains sont inconnues.

```
program CALCTD
include '../FILES/param2d.h'
character*120 bid
c INITIALISATION
open(unit=10,file='../FILES/param.dat')
n=3
rewind(10)
read(10,*) (X0(i),i=1,n)
read(10,*) (Sig(i),i=1,n)
read(10,*) (aT(i),i=1,n)
read(10,*) (aD(i),i=1,n)
close(10)
npT=301
npD=201
Tmin=0.5d2
Tmax=3.0d2
dT=(Tmax-Tmin)/dble(npT-1)
Dmin=1.d1
Dmax=1.2d3
dD=(Dmax-Dmin)/dble(npD-1)
open(unit=10,file='../FILES/Bollengierdata/paramfile.dat')
open(unit=50,file='../FILES/Bollengierdata/
&paramfileTrefDref.dat')
```

```
rewind(10)
read(10,*) np
c CALCUL
do 100 ip=1,np
Xhi2max=1.d55
read(10,*) Tmes,STmes,Dmes,SDmes,(Xm(j),j=1,n),a,a,a,a,a,a,a,
& a,a,a,a,a,a,bid
T=Tmin-dT
do 20 iT=1,npT
T=T+dT
D=Dmin-dD
do 10 iD=1,npD
D=D+dD
call FUNC(T,D)
xhi2=0.d0
do 5 j=1,n
5 xhi2=xhi2+((X(j)-Xm(j))/Sig(j))**2.d0
if (xhi2.lt.xhi2max) then
xhi2max=xhi2
Tref=T
Dref=D
endif
10 continue
20 continue
call FUNC(Tref,Dref)
```



```
write(50,67) ip,Tref,Tmes,Dref,Dmes,
& (X(j),Xm(j),j=1,n),xhi2max
67 format(i4,4f8.2,6(f15.6,2X),e12.4)
100 continue
close(10)
close(50)
end
*********************************************
subroutine FUNC(T,D)
include '../FILES/param2d.h'
do 10 j=1,n
X(j) = X0(j)
& + aT(j)*T
& + aD(j)*(D**0.5d0)
10 continue
return
end
*********************************************
c param2d.h
implicit real*8 (a-h,o-z)
common/par0/Xm(12),Sig(12)
common/par1/X(12),X0(12),T0(12),D0(12)
common/par2/aD(12),aT(12)
common/par3/n
*********************************************
```

```
   6583.83 6373.16 6013.95 6422.82 144.98 158.41
   109.95 632.52 -0.175 -0.214 -0.522 0.0316
   2. 2. 2. 2. 1.5 1.5 1.5 1.5
   0.01 0.01 0.01 0.01
   0.412048 0.486487 0.308591 0.263332 0.154047 0.321491
   0.035767 0.242715 0.000841 0.000817 0.003007 0.000789
   2.955557 -0.304093 0.876487 -11.330140 7.305144 3.239354
   0.376904 13.202336 -0.044741 -0.028860 -0.013510 -0.052195
   paramètres calculés sur les quatre bandes(740bandes aucun
canal vims
   ajouté aux canaux exp)
   ***********************************************
```


Programme en fortran 77 pour générer des spectres théoriques.

```
   ***********************************************
   Version du 07 Fevrier 2010
   OUTPUTS : fichier FILES/spec.out :
   Ligne 1 : Longueurs d'onde
   Ligne 2 - nn : reflectance des spectres
   OUTPUTS : fichier FILES/TempSize.out :
   Ligne 1 - nn : Températures, Tailles de grain
   Je suppose que les incertitudes sont similaires sur les 4
gaussiennes
   ***********************************************
   program MONTECARLO
   include '../FILES/param2d.h'
   write(*,*)'Entrer un nombre entier'
   ng=1
   read(*,*) isee1
   nb=3000
   nNu=3000
   xWl0 = 1.39d0
   xWln = 1.7d0
   do 10 i=1,nb
   xWl(i)= xWl0 + dble(i-1) * (xWln-xWl0) / dble(nb-1)
   10 continue
   do 500 it=1,1
   if (it.ge.500) call INTERRUPT(45)
```

```
xT=ran2(isee1)
xD=ran2(isee1)
TT(it)=60.d0+1.4d2*xT
DD(it)=10.d0+1.d3*xD
call INIT(isee1,ng,TT(it),DD(it))
call SPECTRUM(isee1,it,ng)
open(unit=10,file='../FILES/TempSize.out')
rewind(10)
write(10,*) 'Temp, Size'
do 25 j=1,it
25 write(10,1000) TT(j),DD(j)
close(10)
open(unit=10,file='../FILES/Spec.out')
rewind(10)
write(10,2000) (xWl(i),i=1,nb)
do 100 j=1,it
100 write(10,3000) (Arc(j,i),i=1,nb)
close(10)
500 continue
1000 format(2f8.2)
2000 format(3000(f9.3,1X))
3000 format(3000f10.4)
close(10)
end
*******************************************
```



```
FUNCTION ran2(idum)
implicit real*8 (a-h,o-z)
PARAMETER (IM1=2147483563,IM2=2147483399,AM=1./IM1,IMM1=IM1-1,
IA1=40014,IA2=40692,IQ1=53668,IQ2=52774,IR1=12211,IR2=3791,
NTAB=32,NDIV=1+IMM1/NTAB,EPS=1.2e-7,RNMX=1.-EPS)
INTEGER iv(NTAB)
c SAVE iv,iy,idum2
DATA idum2/123456789/, iv/NTAB*0/, iy/0/
if (idum.le.0) then
idum=max(-idum,1)
idum2=idum
do 11 j=NTAB+8,1,-1
k=idum/IQ1
idum=IA1*(idum-k*IQ1)-k*IR1
if (idum.lt.0) idum=idum+IM1
if (j.le.NTAB) iv(j)=idum
11 continue
iy=iv(1)
endif
k=idum/IQ1
idum=IA1*(idum-k*IQ1)-k*IR1
if (idum.lt.0) idum=idum+IM1
k=idum2/IQ2
idum2=IA2*(idum2-k*IQ2)-k*IR2
if (idum2.lt.0) idum2=idum2+IM2
```

```
j=1+iy/NDIV
iy=iv(j)-idum2
iv(j)=idum
if(iy.lt.1)iy=iy+IMM1
ran2=dmin1(AM*iy,RNMX)
return
END
*********************************************
subroutine INTERRUPT(ierr)
procedure d'arret du programme en cas d'erreur
include '../FILES/param2d.h'
write(*,*) 'erreur durant l éxécution du programme'
write(*,*) 'code erreur : ',ierr
stop
end
*********************************************
subroutine INIT(i0,ng,Temp,siz)
include '../FILES/param2d.h'
sigL=0.00d0
sigW=0.00d0
sigP=0.00d0
SL=ran2(i0)
SW=ran2(i0)
SP=ran2(i0)
open(unit=10,file='../FILES/param.dat')
```



```
rewind(10)
do 10 ip=1,ng
read(10,*)(X0(j),j=1,3),(aT(j),j=1,3),(aD(j),j=1,3)
xL(ip)=X0(1)+aT(1)*Temp+aD(1)*dsqrt(siz)
xW(ip)=X0(2)+aT(2)*Temp+aD(2)*dsqrt(siz)
xP(ip)=X0(3)+aT(3)*Temp+aD(3)*dsqrt(siz)
c xL(ip)=xL(iP)*(1.d0+sigL*(0.5d0-SL))
c xW(ip)=xW(iP)*(1.d0+sigW*(0.5d0-SW))
c xP(ip)=xP(iP)*(1.d0+sigP*(0.5d0-SP))
10 continue
close(10)
c open(unit=10, file='../FILES/Wlexp.dat')
c rewind(10)
c read(10,*) nNu
c do 100 i=1,nNu
c read(10,*) xNu(i)
c 100 continue
c close(10)
return
end
*********************************************
subroutine SPECTRUM(i0,iter,ng)
c GENERATION DE SPECTRES THEORIQUES
include '../FILES/param2d.h'
sigG=0.00d0
```

```
do 20 j= 1,nb
SG=ran2(i0)
gss=0.d0
do 10 i=1,ng
gss=gss-(xP(i)**2.d0)*
dexp(-(1.d0/2.d0)*((xWl(j)-xL(i))/(xW(i)/2.35482d0))**2.d0)
+10.d0
c write(*,*) i,j,xP(i),xL(i),xW(i),xWl(j),gss
10 continue
c gss=dexp(gss*(1.d0+(0.5d0-SG)*sigG))
c+P1*xNu(j)+P0)
if (j.eq.1) gss1=gss
if (j.ge.2) Arc(iter,j)=gss/gss1
20 continue
Arc(iter,1)=1.d0
return
end
*******************************************
c param2d.h
implicit real*8 (a-h,o-z)
common/par0/X0(3),aT(3),aD(3)
common/par1/xL(4),xP(4),xW(4)
common/par3/Arc(1,3000)
common/par3/TT(2000),DD(2000)
common/par4/xNu(3000),xWl(3000),nNu,nb
```


Programme en Origin C pour automatiser l'analyse des spectres expériementaux sous Origin Pro©.

```
écrit par Manuel GIRAUD, LPGN, le 11/03/2010
♯ include <Origin.h>
♯ include <XFbase.h>
void mypa(XYRange range, string fitname, int sm)
{
XFBase xf("pa");
if(!xf.IsValid())
{
out_str("Failed to load xfunction.");
return;
}
/* Ne pas ouvrir la boite de dialogue. */
if (!xf.SetArg("smode", sm)) {
out_str("Failed to set argument smode");
return;
}
/* Nom du fichier de fit */
if (!xf.SetArg("theme", fit_name)) {
out_str("Failed to set argument theme");
return;
}
/* Positionnement de l'argument range */
if (!xf.SetArg("iy", range)) {
```

```
out_str("Failed to set argument iy");
return;
}
/* Eval */
if (!xf.Evaluate())
{
out_str("Failed to execute the X-Function!");
return;
}
}
void multipeak_fit(string input_name)
{
vector<float> wl;
vector<float> ref;
int i;
XYRange range;
int iStatus;
ASCIMP ai;
Worksheet wks;
int nbrows;
if(AscImpReadFileStruct(input_name, &ai) == 0)
{
ai.iRenameWks = 0;
ai.iRenameCols = 0;
ai.iPartial = 1;
```



```
ai.iPartialC1 = 0;
ai.iPartialC2 = 1;
ai.iPartialR1 = 0;
ai.iPartialR2 = 899;
if (!wks.IsValid()) {
wks.Create();
}
wks.ImportASCII(input_name, ai);
} else {
printf("Failed to load file %s\n", input_name);
return;
}
/* Peak Analyser sur le spectre avec la ligne de base prédéfini
(colonne F) */
range.Add("X", wks, 0, 0, -1, 0);
range.Add("Y", wks, 0, 1, -1, 1);
int sm=1;
mypa(range, "Fitfile",sm);
WorksheetPage wksPage = wks.GetPage();
Worksheet wks2 = wksPage.Layers(3);
string output_name = GetFilenameWithoutExt(input_name) +
".fitpeak";
wks2.ExportASCII(output_name, WKS_EXPORT_ALL);
wksPage.SaveToFile(GetFilenameWithoutExt(input_name) + ".OGW");
}
```

```
void auto_multipeak_fit()
{
int nf = 5;
int i=0;
char nfile[110];
string fich;
for (i=1; i<nf+1; i++)
{
sprintf(nfile, "C :\\CDup\\TheseDupire\\These\\Experimentations
\\C.O\\20100226\\Spectre %d_microns_norm_origin.CSV", i);
fich = nfile;
multipeak_fit(fich);
}
return;
}
```


Programme sous IDL qui génère les cartes de température et de taille de grains et qui les projette **********

```
; ; Convert a CUB filename to the corresponding NAV filename.
function cub2nav_name, filename
fname = file_basename(filename, « .cub »)
parse = stregex(fname, « [a-zA-Z]+_([0-9]+)_ ?.*_([0-9]+) », /extract, /subexpr)
return, « V »+ parse[1] + « _ »+ parse[2] + « .nav »
end
; ; Loads all data from the given filename in a flat tab.
function read_flat_data, name, wl
envi_open_file, name, r_fid = fid, /no_realize
if (fid eq -1) then return, fid
envi_file_query, fid, dims = dims, nl = nl, ns = ns, nb = nb, wl = wl
data = fltarr(ns * nl, nb)
for band = 0, (nb - 1) do begin
data[*, band] = envi_get_data(fid = fid, dims = dims, pos = band)
end
envi_file_mng, id = fid, /remove
return, data
end
; ; Save data in an image named 'name'. (XXX implied BSQ (0) interleave).
pro save_img, data, wl, name
sz = size(data)
; ; Data
openw, lun, name, /get_lun
```

```
writeu, lun, data
if (sz[0] eq 1) then begin
ns = sz[1]
nl = 1
nb = 1
dt = sz[2]
end else if (sz[0] eq 2) then begin
ns = sz[1]
nl = 1
nb = sz[2]
dt = sz[3]
end else if (sz[0] eq 3) then begin
ns = sz[3]
nl = sz[2]
nb = sz[1]
dt = sz[4]
end
; ; Header
envi_setup_head, fname=name, $
ns = ns, nl = nl, $
nb = nb, interleave = 0, $
data_type = dt, $
wl = wl, wavelength_units = 0, $
offset = 0, /write
close, lun
```



```
    end
    ; ; Génère le megacube (concaténation de plusieurs cubes) àă partir des noms des
cubes et sauvegarde le tout dans les fichiers dataname et navname.
    pro gen_megacube, innames, dataname, navname
    nb_names = n_elements(innames)
    nbpix = 0
    ; ; Récupération des cubes
    for i = 0, (nb_names - 1) do begin
    if (i eq 0) then begin
    megatab = read_flat_data(innames[i], wl)
    end else begin
    megatab = [megatab, read_flat_data(innames[i], wl)]
    end
    end
    save_img, megatab, wl, dataname
    ; ; Récupération données de navigation
    for i = 0, (nb_names - 1) do begin
    tmp_nav_name = cub2nav_name(innames[i])
    if (i eq 0) then begin
    meganav = read_flat_data(tmp_nav_name, wl)
    end else begin
    meganav = [meganav, read_flat_data(tmp_nav_name, wl)]
    end
    end
    save_img, meganav, wl, navname
```

```
end
;;;
```

```
; ; Returns a TrueColor image of size (xs, ys) with an orthographic projection of
'map_filename' looking at (lat, lon). Data stored in cubname file are mapped above.
function ortho_map_image, xs, ys, lat, lon, $
mapname = map_filename, $
colormap = colormap, $
alpha = alpha, $
minparam = minparam, maxparam = maxparam, cbar_fmt = cbar_fmt, $
cubname = cubname, navname = navname, maskname = maskname, $
spencer = spencer, rgb = rgb
;Layer 1 : surface map
;Lecture de carte pour une image indexée on prend une colormap en niveau de gris.
map = tcread_image(map_filename, colormap = 0, w, h)
;On retourne l'image car celle-ci s'incrémente en longitude vers l'ouest (i.e. vers la
gauche).
map = reverse(map, 2)
map = shift(map, [0, w / 2, 0])
;Set map size and allocate output
window, /free, xsize = xs, ysize = ys ;, /pixmap
win = !D.WINDOW
background = bytarr(3, xs, ys)
;Orthographic projection looking at (lat, lon)
map_set, /orthographic, lat, lon, position = [0, 0, 1, 1], $
xmargin = [1, 1], ymargin = [1, 1], color = 0, $
limit = [-90, 0, -50, 360], reverse = 1
;Compute each map plane each RGB channel
```



```
for chan = 0, 2 do begin
curr_plane = reform(map[chan, *, *])
background[chan, *, *] = map_image(curr_plane, startx, starty, $
xsize, ysize, $
latmin = -90, latmax = 90, $
lonmin = 0, lonmax = 360, $
compress = 1, /bilinear)
end
; ; Do draw map
tvscl, background, startx, starty, xsize = xsize, ysize = ysize, true = 1
Layer 2 : Cub data
; ; Lecture du masque (si présent)
if (n_elements(maskname)) then begin
mask = read_all_data(maskname, wl, wu)
end
nav = read_all_data(navname, wl, wu)
cub = read_all_data(cubname, wl, wu)
nl = (size(cub))[2]
ns = (size(cub))[3]
; ; Paramètre du cube de données.
param = cub
if (n_elements(rgb) eq 0) then begin
device, decomposed = 0
loadct, colormap
if (n_elements(minparam) eq 0) then minparam = min(param)
```

```
if (n_elements(maxparam) eq 0) then maxparam = max(param)
end else begin
device, decomposed = 1
r = wl2i(rgb[0], wl)
g = wl2i(rgb[1], wl)
b = wl2i(rgb[2], wl)
if (n_elements(maxparam) eq 0) then begin
maxparam = fltarr(3)
maxparam[0] = max(param[r, *, *])
maxparam[1] = max(param[g, *, *])
maxparam[2] = max(param[b, *, *])
end else begin
if (maxparam[0] gt 1) then maxparam[0] = max(param[r, *, *])
if (maxparam[1] gt 1) then maxparam[1] = max(param[g, *, *])
if (maxparam[2] gt 1) then maxparam[2] = max(param[b, *, *])
end
if (n_elements(minparam) eq 0) then begin
minparam = fltarr(3)
minparam[0] = min(param[r, *, *])
minparam[1] = min(param[g, *, *])
minparam[2] = min(param[b, *, *])
end else begin
if (minparam[0] lt 0) then minparam[0] = min(param[r, *, *])
if (minparam[1] lt 0) then minparam[1] = min(param[g, *, *])
if (minparam[2] lt 0) then minparam[2] = min(param[b, *, *])
```



```
end
param[r, *, *] = bytscl(param[r, *, *], min = minparam[0], max = maxparam[0])
param[g, *, *] = bytscl(param[g, *, *], min = minparam[1], max = maxparam[1])
param[b, *, *] = bytscl(param[b, *, *], min = minparam[2], max = maxparam[2])
end
for i = 0, (nl - 1) do begin
for j = 0, (ns - 1) do begin
dlon = - nav[5 :8, i, j]
dlat = nav[9 :12, i, j]
if (n_elements(rgb) eq 0) then begin
col = bytscl(param[0, i, j], min = minparam, max = maxparam)
end else begin
col = param[r, i, j] + $
param[g, i, j] * 256UL + $
param[b, i, j] * 256UL * 256UL
end
if ((min(dlat) ge -90) and (max(dlat) le 90)) and $
((min(dlon) ge -180) and (max(dlon) le 360)) then begin
if (n_elements(maskname)) then begin
if (mask[0, i, j]) then begin
polyfill, dlon, dlat, /data, color = col
end
end else begin
polyfill, dlon, dlat, /data, color = col
end
```

```
end
end
end
foreground = tvrd(true = 1)
; ; Composition avec transparence
; ; (http ://www.dfanning.com/color_tips/color_overlay.html)
if n_elements(alpha) eq 0 then alpha = 0.5
composed = BYTE(alpha * FLOAT(background) + (1.0 - alpha) * FLOAT(foreground))
tvscl, composed, startx, starty, xsize = xsize, ysize = ysize, true = 1
; ; Color bar
if (n_elements(rgb) eq 0) then begin
colorbar, position = [0.87, 0.1, 0.90, 0.9], /vertical, /right, $
color = 0, format = cbar_fmt, $
minrange = minparam, maxrange = maxparam, divisions = 10
end
; ; Layer 2bis : Spencer data (Spencer et al., 2006)
; ;lat lon res(km) temp(k)
; ;-69 171W 17.5 114+-22
; ;-84 137W 6.0 117+-16
; ;-87 236W 5.8 135+-9
; ;-80 289W 5.8 145+-14
; ;-78 78W 13.6 133+-28
; ;-75 328W 13.3 157+-24
; ;-76 115W 6.0 127+-28
if (not (n_elements(spencer) eq 0)) then begin
```



```
lonS = [ 171, 137, 236, 289, 78, 328, 115 ]
latS = [-69, -84, -87, -80, -78, -75, -76]
DataS = [ ' 114', ' 117', ' 135', ' 145', ' 133', ' 157', ' 127' ]
resoS = [ 1., 3, 2.9, 2.9, 6.8, 6.65, 3]
device, decomposed = 0
loadct, 0
xyouts, lonS, latS, DataS, color=0, CHARTHICK= 2.5
plots, lonS, latS, psym=4, color=0, symsize=0.8, THICK= 3
end
; ; Layer 3 : Grid
device, decomposed = 0
loadct, 0
map_grid, latdel = 25, londel = 30, /horizon, $
label = 1, color = 255, CHARSIZE= 1, $
glinethick = 1, glinestyle = 3
; ; Return TrueColor img
res = tvrd(true = 1)
; ;wdelete, win
return, res
end
;;;
```

```
    a = total(data[134 :136, *, *], 3) / 3
    return, a
    end
    ; ; Profondeur bande àă 1.5
    function band1_5, data, wl
    a = abs(1 - (2 * data[wl2i(1.5, wl), *, *]) / (data[wl2i(1.34, wl), *, *] + data[wl2i(1.82,
wl), *, *]))
    return, a
    end
    ; ; Pic de Fresnel
    function pic_fresnel, data, wl
    xf = 3.0969
    x2 = 3.1797
    x1 = 3.0138
    y1 = data[wl2i(x1, wl), *, *]
    y2 = data[wl2i(x2, wl), *, *]
    yf = data[wl2i(xf, wl), *, *]
    a = abs(yf - ((xf - x1) * ((y2 - y1) / (x2 - x1)) + y1))
    return, a
    end
    ;;;
```

```
mask[0, 0, i] = ((m_albedo[*, *, i] lt 0.075) ? mask[0, 0, i] : 0)
end
save_img, mask, wl, "MASK_tg"
**********
; ; Correction du décalage de la projection Nav(i,j)=Nav(i+1,j+1)
; ; décalage d'un pixel en diagonal - unique àă chaque cube
nav = read_flat_data("NAV", wl)
k=0
for i = 0, 362, 28 do begin
for k = 0, 26 do begin
nav[k + i, *] = nav[k + i + 28 + 1, *]
end
end
for i = 363, 391 do begin
nav[i, *] = 0
end
k=0
for i = 392, 754, 28 do begin
for k = 0, 26 do begin
nav[k + i, *] = nav[k + i + 28 + 1, *]
end
end
for i = 755, 783 do begin
nav[i, *] = 0
end
```



```
save_img, nav, wl, "NAV_tg"
**********
; ; Masque pour la température ...
gen_megacube, ["CM_1500061286_1.cub"], "MASK", "NAV"
nav = read_all_data("NAV", wl, wu)
data = read_all_data("MASK", wl, wu)
mask = pic_fresnel(data, wl)
save_img, mask, wl, "FRESNEL"
sz = size(mask)
; ; ... Pic de Fresnel
for i = 0, (sz[3] - 1) do begin
mask[0, 0, i] = ((mask[*, *, i] ge 0.0018) ? 1 : 0)
end
; ; ... angle d'incidence inférieur àă 90ř
m_incid = incidence(nav)
sz = size(m_incid)
for i = 0, (sz[3] - 1) do begin
mask[0, 0, i] = ((m_incid[*, *, i] lt 90.0) ? mask[0, 0, i] : 0)
end
; ; ... albedo
m_albedo = albedo(nav)
sz = size(m_albedo)
for i = 0, (sz[3] - 1) do begin
mask[0, 0, i] = ((m_albedo[*, *, i] lt 0.075) ? mask[0, 0, i] : 0)
end
```

```
save_img, mask, wl, "MASK_ts"
****************************************
; ; Correction du dÃl'calage de la projection Nav(i,j)=Nav(i+1,j+1)
; ; décalage d'un pixel en diagonal - unique àă chaque cube
nav = read_flat_data("NAV", wl)
k=0
for i = 0, 362, 28 do begin
for k = 0, 26 do begin
nav[k + i, *] = nav[k + i + 28 + 1, *]
end
end
for i = 363, 391 do begin
nav[i, *] = 0
end
save_img, nav, wl, "NAV_ts"
****************************************
; ; Masque pour Fresnel ...
gen_megacube, ["CM_1500061286_1.cub"], "MASK", "NAV"
nav = read_all_data("NAV", wl, wu)
data = read_all_data("MASK", wl, wu)
mask = incidence(nav)
sz = size(mask)
; ; ... angle d'incidence inférieur àă 90ř
for i = 0, (sz[3] - 1) do begin
mask[0, 0, i] = ((mask[*, *, i] lt 90.0) ? 1 : 0)
```



```
end
; ; ... albedo
m_albedo = albedo(nav)
sz = size(m_albedo)
for i = 0, (sz[3] - 1) do begin
mask[0, 0, i] = ((m_albedo[*, *, i] lt 0.075) ? mask[0, 0, i] : 0)
end
save_img, mask, wl, "MASK_fr"
************************************
; ; Carte de taille de grain
gen_megacube, ["Enc_1500061286_tg_1.cub"], "CUBE", "NAV"
img = ortho_map_image(1024, 1024, -90, 0, $
mapname = "enceladus_map.png", $
colormap = 25, $
alpha = 0.3, $
minparam = 50, maxparam = 250, $
cbar_fmt = '(I0)', $
cubname = "CUBE", $
navname = "NAV_ts", $
maskname = "MASK_fr")
write_png, "enceladus_grain.png", img
; ; Carte de température
gen_megacube, ["Enc_1500061286_ts_1.cub"], "CUBE", "NAV"
img = ortho_map_image(1024, 1024, -90, 0, $
mapname = "enceladus_map.png", $
```

```
colormap = 25, $
alpha = 0.3, $
minparam = 70, maxparam = 180, $
cbar_fmt = '(I0)', $
cubname = "CUBE", $
navname = "NAV_ts", $
maskname = "MASK_ts", $
spencer = 1)
write_png, "enceladus_temp.png", img
; ; Carte du pic de Fresnel
img = ortho_map_image(1024, 1024, -90, 0, $
mapname = "enceladus_map.png", $
colormap = 0, $
alpha = 0.3, $
minparam = 0.6e-3, maxparam = 6.6e-3, $
cbar_fmt = '(F0)', $
cubname = "FRESNEL", $
navname = "NAV_ts", $
maskname = "MASK_fr")
write_png, "enceladus_fresnel.png", img
; ; Carte du composé coloré
gen_megacube, ["CM_1500061286_1.cub"], "CUBE", "NAV"
img = ortho_map_image(1024, 1024, -90, 0, $
mapname = "enceladus_map.png", $
colormap = 0, $
```



```
alpha = 0.3, $
cbar_fmt = '(I0)', $
cubname = "CUBE", $
navname = "NAV_ts", $
maskname = "MASK_fr", $
rgb = [1.4094, 1.5567, 1.7054])
write_png, "enceladus_comp.png", img
end
************************************
```

Bibliographie

Abramov, O. et Spencer, J. R. (2009). Endogenic heat from enceladus' south polar fractures : new observations, and models of conductive surface heating. *Icarus*, 199(1), 189–196.

Abyzov, S., Mitskevich, I., Poglazova, M., Barkov, N., Lipenkov, V., Bobin, N., Koudryashov, B., Pashkevich, V., et Ivanov, M. (2001). Microflora in the basal strata at antarctic ice core above the vostok lake. *Advances in Space Research*, 28, 701–706. doi :10.1016/S0273-1177(01)00318-0.

Adams, J., Smith, M., et Gillespie, A. (1993). Imaging spectroscopy : Interpretation based on spectral mixture analysis. In C. Pieter et P. Englert, eds., *Remote geochemical analysis : elemental and mineralogical composition*. Cambridge University Press.

Allen, D. A. et Crawford, J. W. (1984). Cloud structure on the dark side of venus. *Nature*, 307, 222–224.

Anderson, J. D., Jacobson, R. A., McElrath, T. P., Moore, W. B., Schubert, G., et Thomas, P. C. (2001). Shape, mean radius, gravity field, and interior structure of callisto. *Icarus*, 153(1), 157–161.

Arhenkiel, R. (1971). Modified kramers-kronig analisis of optical spectra. *J. Opt. Soc. Am.*, 61, 1651–1655.

Bar-nun, A., Herman, G., Laufer, D., et Rappaport, M. L. (1985). Trapping and release of gases by water ice and implications for icy bodies. *Icarus*, 63(3), 317–332.

Barr, A., Pappalardo, R. T., et Stevenson, D. (2001). Rise of deep melt into Ganymede's ocean and implications for astrobiology. In *Lunar and Planetary Science Conference 32 : 1781*.

Bell, J. F., Cruikshank, D. P., et Gaffey, M. J. (1985). The composition and origin of the Iapetus dark material. *Icarus*, 61(2), 192–207.

Bell, J. I., Calvin, W., Ockert-Bell, M., Crisp, D., Pollack, J., et Spencer, J. (1996). Detection and monitoring of H_2O and CO_2 ice clouds on Mars. *J. Geophys. Res.*, 101(E4), 9227–9237.

Belton, M., Head, J., III, Ingersoll, A., Greeley, R., McEwen, A., Klaasen, K., Senske, D., Pappalardo, R., Collins, G., Vasavada, A., Sullivan, R., Simonelli, D., Geissler, P., Carr, M., Davies, M., Veverka, J., Gierasch, P., Banfield, D., Bell, M., Chapman, C., Anger, C., Greenberg, R., Neukum, G., Pilcher, C., Beebe, R., Burns, J., Fanale, F., Ip, W., Johnson, T., Morrison, D., Moore, J., Orton, G., Thomas, P., et West, R. (1996). Galileo's first images of Jupiter and the galilean satellites. *Science*, 274, 377–385.

Bergren, M. S., Schuh, D., Sceats, M. G., et Rice, S. A. (1978). Oh stretching region infrared-spectra of low-density amorphous solid water and polycrystalline ice ih. *Journal Of Chemical Physics*, 69(8), 3477–3482.

Bernstein, M., Cruikshank, D., et Sandford, S. (2005). Near-infrared laboratory spectra

of solid H_2O/CO_2 and CH_3OH/CO_2 ice mixtures. *Icarus*, 179, 527–534. doi : 10.1016/j.icarus.2005.07.009.

Bernstein, M. P., Cruikshank, D. P., et Sandford, S. A. (2006). Near-infrared spectra of laboratory H_2O-CH_4 ice mixtures. *Icarus*, 181(1), 302–308.

Bertie, J., Bates, F., et Hendricksen, D. (1975). The far infrared spectra and X-Ray powder diffraction patterns of the structure I hydrates of cyclopropane and ethylene oxide at 100 °K. *Can. J. Chem.*, 53(1), 71–75.

Bertie, J. E. et Devlin, J. P. (1983). Infrared spectroscopic proof of the formation of the structure I hydrate of oxirane from annealed low-temperature condensate. *J. Chem. Phys.*, 78(10), 6340–6341.

Bertie, J. E., Labbe, H., et Whalley, E. (1969). Absorptivity of ice i in the range 4000 âĂŞ 30 cm^{-1}. *J. Chem. Phys.*, 50, 4501–4520.

Bertie, J. E. et Whalley, E. (1964). Infrared spectra of ices Ih and Ic in the range 4000 to 350 cm^{-1}. *J. Chem. Phys.*, 40, 1637.

Bertie, J. E. et Whalley, E. (1967). Optical spectra of orientationally disordered crystals. II. Infrared spectrum of ice Ih and ice Ic from 360 to 50 cm^{-1}. *J. Chem. Phys.*, 46, 1271.

Bierhaus, E., Zahnle, K., et Chapman, C. (2009). Europa's crater distributions and surface ages. In R. Pappalardo, W. McKinnon, et K. Khurana, eds., *Europa*, pp. 161–180. The university of Arizona Press.

Blake, D., Allamandola, L., Sandford, S., Hudgins, D., et Freund, F. (1991). Clathrate

hydrate formation in amorphous cometary ice analogs in vacuo. *Science*, 254, 548–551.

Bland, M., Showman, A., et Tobie, G. (2007). Ganymede's orbital and thermal evolution and its effect on magnetic field generation. In *Lunar and Planetary Science XXXVIII : 2020*.

Briscoe, B. et Kelly, C. (1995). The plasticization of a polyurethane by carbon dioxide at high pneumatic stresses. *Polymer*, 36, 3099–3102.

Brown, R., Clark, R., Buratti, B., Cruikshank, D., Barnes, J., Mastrapa, R., Bauer, J., Newman, S., Momary, T., Baines, K., Bellucci, G., Capaccioni, F., Cerroni, P., Combes, M., Coradini, A., Drossart, P., Formisano, V., Jaumann, R., Langevin, Y., Matson, D., McCord, T., Nelson, R., Nicholson, P., Sicardy, B., et Sotin, C. (2006). Composition and physical properties of Enceladus' surface. *Science*, 311, 1425–1428.

Brown, R. H., Baines, K. H., Bellucci, G., Bibring, J.-P., Buratti, B. J., Capaccioni, F., Cerroni, P., Clark, R. N., Coradini, A., Cruikshank, D. P., Drossart, P., Formisano, V., Jaumann, R., Langevin, Y., Matson, D. L., Mccord, T. B., Mennella, V., Miller, E., Nelson, R. M., Nicholson, P. D., Sicardy, B., et Sotin, C. (2004). The Cassini Visual and Infrared Mapping Spectrometer (VIMS) investigation. *Space Science Reviews*, 115(1), 111–168.

Buratti, B. (1993). *Scientific Objectives of VIMS at Saturn*.

Buratti, B., Cruikshank, D. P., Brown, R. H., Clark, R. N., Bauer, J. M., Jaumann, R., McCord, T. B., Simonelli, D. P., Hibbitts, C. A., Hansen, G. B., Owen, T. C., Baines,

K. H., Bellucci, G., Bibring, J.-P., Capaccioni, F., Cerroni, P., Coradini, A., Drossart, P., Formisano, V., Langevin, Y., Matson, D. L., Mennella, V., Nelson, R. M., Nicholson, P. D., Sicardy, B., Sotin, C., Roush, T. L., Soderlund, K., et A., M. (2005). Cassini Visual and Infrared Mapping Spectrometer observations of Iapetus : Detection of CO_2. *The Astrophysical Journal Letters*, 622(2), L149.

Buratti, B., Soderlund, K., Bauer, J., Mosher, J., Hicks, M., Simonelli, D., Jaumann, R., Clark, R., Brown, R., Cruikshank, D., et Momary, T. (2008). Infrared (0.83-5.1 [mu]m) photometry of phoebe from the cassini visual infrared mapping spectrometer. *Icarus*, 193(2), 309–322.

Calvin, W. M. et Clark, R. N. (1991). Modeling the reflectance spectrum of Callisto 0.25 to 4.1 μm. *Icarus*, 89(2), 305–317.

Calvin, W. M. et Clark, R. N. (1993). Spectral distinctions between the leading and trailing hemispheres of Callisto : new observations. *Icarus*, 104(1), 69–78.

Calvin, W. M., Clark, R. N., Brown, R. H., et Spencer, J. R. (1995). Spectra of the icy galilean satellites from 0.2 to 5 μm : a compilation, new observations, and a recent summary. *J. Geophys. Res.*, 100(E9), 19041–19048.

Calvin, W. M., Johnson, R. E., et Spencer, J. R. (1996). O_2 on Ganymede : spectral characteristics and plasma formation mechanisms. *Geophys. Res. Lett.*, 23(6), 673–676.

Calvin, W. M. et Spencer, J. R. (1997). Latitudinal distribution of O_2 on Ganymede : observations with the Hubble space telescope. *Icarus*, 130(2), 505–516.

Carlson, R. (2001). Spatial distribution of carbon dioxide, hydrogen peroxide, and sulfuric acid on Europa. *Bulletin of the American Astronomical Society*, 33, 1125.

Carlson, R., Smythe, W., Baines, K., Barbinis, E., Becker, K., Burns, R., Calcutt, S., Calvin, W., Clark, R., Danielson, G., Davies, A., Drossart, P., Encrenaz, T., Fanale, F., Granahan, J., Hansen, G., Herrera, P., Hibbitts, C., Hui, J., Irwin, P., Johnson, T., Kamp, L., Kieffer, H., Leader, F., Lellouch, E., Lopes-Gautier, R., Matson, D., McCord, T., Mehlman, R., Ocampo, A., Orton, G., Roos-Serote, M., Segura, M., Shirley, J., Soderblom, L., Stevenson, A., Taylor, F., Torson, J., Weir, A., et Weissman, P. (1996). Near-infrared spectroscopy and spectral mapping of Jupiter and the galilean satellites : results from Galileo's initial orbit. *Science*, 274(5286), 385–388.

Carlson, R. W. (1999). A tenuous carbon dioxide atmosphere on Jupiter's moon Callisto. *Science*, 283(5403), 820–821.

Carlson, R. W., Anderson, M. S., Johnson, R. E., Schulman, M. B., et Yavrouian, A. H. (2002). Sulfuric acid production on Europa : The radiolysis of sulfur in water ice. *Icarus*, 157(2), 456–463.

Carlson, R. W., Anderson, M. S., Johnson, R. E., Smythe, W. D., Hendrix, A. R., Barth, C. A., Soderblom, L. A., Hansen, G. B., McCord, T. B., Dalton, J. B., Clark, R. N., Shirley, J. H., Ocampo, A. C., et Matson, D. L. (1999a). Hydrogen peroxide on the surface of Europa. *Science*, 283(5410), 2062–2064.

Carlson, R. W., Baines, K. H., Encrenaz, T., Taylor, F. W., Drossart, P., Kamp, L. W., Pollack, J. B., Lellouch, E., Collard, A. D., Calcutt, S. B., Grinspoon, D., Weissman, P. R., Smythe, W. D., Ocampo, A. C., Danielson, G. E., Fanale, F. P., Johnson, T. V., Kieffer, H. H., Matson, D. L., McCord, T. B., et Soderblom, L. A. (1991). Galileo

infrared imaging spectroscopy measurements at Venus. *Science*, 253(5027), 1541–1548.

Carlson, R. W., Johnson, R. E., et Anderson, M. S. (1999b). Sulfuric acid on Europa and the radiolytic sulfur cycle. *Science*, 286(5437), 97–99.

Carlson, R. W., Weissman, P. R., Smythe, W. D., et Mahoney, J. C. (1992). Near-infrared mapping spectrometer experiment on Galileo. *Space Science Reviews*, 60(1), 457–502.

Carr, M. H., Belton, M. J. S., Bender, K., Breneman, H., Greeley, R., Head, J. W., Klaasen, K. P., McEwen, A. S., Moore, J. M., Murchie, S., Pappalardo, R. T., Plutchak, J., Sullivan, R., Thornhill, G., et Veverka, J. (1995). The Galileo imaging team plan for observing the satellites of Jupiter. *J. Geophys. Res.*, 100(E9), 18935–18955.

Carr, M. H., Belton, M. J. S., Chapman, C. R., Davies, M. E., Geissler, P., Greenberg, R., McEwen, A. S., Tufts, B. R., Greeley, R., Sullivan, R., Head, J. W., Pappalardo, R. T., Klaasen, K. P., Johnson, T. V., Kaufman, J., Senske, D., Moore, J., Neukum, G., Schubert, G., Burns, J. A., Thomas, P., et Veverka, J. (1998). Evidence for a subsurface ocean on Europa. *Nature*, 391(6665), 363–365.

Casacchia, R. et Strom, R. G. (1984). Geologic evolution of Galileo Regio, Ganymede. *J. Geophys. Res.*, 89(S2), B419–B428.

Cassen, P., Reynolds, R., et J., P. S. (1979). Is there liquid water on Europa ? *Geophys. Res. Lett.*, 6(9), 731–734.

Chaban, G. M., Bernstein, M., et Cruikshank, D. P. (2007). Carbon dioxide on planetary

bodies : theoretical and experimental studies of molecular complexes. *Icarus*, 187(2), 592–599.

Chandrasekhar, S. (1960). *Radiative transfer*.

Chapman, C., Merline, W., Bierhaus, B., Keller, J., Brooks, S., McEwen, A., Tufts, B., Moore, J., Carr, M., Greeley, R., Bender, K., Sullivan, R., Head, J., Pappalardo, R., Belton, M., Neukum, G., Wagner, R., Pilcher, C., et the Galileo Imaging Team. (1997). Populations of small craters on Europa, Ganymede, and Callisto : initial Galileo imaging results. In *Lunar and Planet. Sci. 28th*.

Charnoz, S., Salmon, J., et Crida, A. (2010). The recent formation of saturn's moonlets from viscous spreading of the main rings. *Nature*, 465(7299), 752–754.

Chiou, C. (2002). *Partition and adsorption of organic contaminants in environmental systems*. Wiley Interscience.

Chyba, C. et Phillips, C. (2001). Possible ecosystems and the search for life on Europa. *PNAS*, 98, 801–804.

Chyba, C. F., Ostro, S. J., et Edwards, B. C. (1998). Radar detectability of a subsurface ocean on Europa. *Icarus*, 134(2), 292–302.

Clark, R. (1981a). The spectral reflectance of water-mineral mixtures at low temperatures. *J. Geophys. Res.*, 86, 3074–3086.

Clark, R. (1981b). Water frost and ice : the near-infrared spectral reflectance 0.65-2.5 μm. *Journal of Geophysical Research*, 86, 3087–3096.

Clark, R. (1999). Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy. In A. Rencz, ed., *Remote sensing for the earth sciences : manual of remote sensing*. New York : John Wiley & Sons.

Clark, R., Brown, R., Baines, K., Bellucci, G., Bibring, J., Buratti, B., Capaccioni, F., Cerroni, P., Combes, M., Coradini, A., Cruikshank, D., Drossart, P., Filacchione, G., Formisano, V., Jaumann, R., Langevin, Y., Matson, D., McCord, T., Mennella, V., Nelson, R., Nicholson, P., Sicardy, B., Soti, C., Curchin, J., et Hoefen, T. (2005a). Cassini VIMS compositional mapping of surfaces in the Saturn system and the role of water, cyanide compounds and carbon dioxide. *Bulletin of the American Astronomical Society*, 37, 705.

Clark, R., Fanale, F., et Gaffey, M. (1986). Surface composition of satellites. In J. Burns et M. Matthews, eds., *Satellites*, pp. 437–491. University of Arizona Press, Tucson.

Clark, R. et Lucey, P. (1984). Spectral properties of ice-particulate mixtures and implications for remote sensing 1. intimate mixtures. *J. Geophys. Res.*, 89, 6341–6348.

Clark, R. et Roush, T. (1984). Reflectance spectroscopy : quantitative analysis techniques for remote sensing applications. *Journal of Geophysical Research*, 89, 6329–6340.

Clark, R. N. (1980). Ganymede, Europa, Callisto, and Saturn's rings : compositional analysis from reflectance spectroscopy. *Icarus*, 44(2), 388–409.

Clark, R. N., Brown, R. H., Jaumann, R., Cruikshank, D. P., Nelson, R. M., Buratti, B. J., McCord, T. B., Lunine, J., Baines, K. H., Bellucci, G., Bibring, J.-P., Capaccioni, F., Cerroni, P., Coradini, A., Formisano, V., Langevin, Y., Matson, D. L., Mennella, V.,

Nicholson, P. D., Sicardy, B., Sotin, C., Hoefen, T. M., Curchin, J. M., Hansen, G., Hibbits, K., et Matz, K.-D. (2005b). Compositional maps of Saturn's moon Phoebe from imaging spectroscopy. *Nature*, 435(7038), 66–69.

Clark, R. N., Brown, R. H., Owensby, P. D., et Steele, A. (1984). Saturn's satellites : Near-infrared spectrophotometry (0.6-2.5 μm) of the leading and trailing sides and compositional implications. *Icarus*, 58(2), 265–281.

Clark, R. N., Curchin, J. M., Hoefen, T. M., et Swayze, G. A. (2009). Reflectance spectroscopy of organic compounds : 1. alkanes. *J. Geophys. Res.*, 114(E3), E03001–.

Clark, R. N., Curchin, J. M., Jaumann, R., Cruikshank, D. P., Brown, R. H., Hoefen, T. M., Stephan, K., Moore, J. M., Buratti, B. J., Baines, K. H., Nicholson, P. D., et Nelson, R. M. (2008). Compositional mapping of Saturn's satellite Dione with Cassini VIMS and implications of dark material in the Saturn system. *Icarus*, 193(2), 372–386.

Clark, R. N., Fanale, F. P., et Zent, A. P. (1983). Frost grain size metamorphism : Implications for remote sensing of planetary surfaces. *Icarus*, 56(2), 233–245.

Clark, R. N. et Mc Cord, T. B. (1980). The galilean satellites : new near-infrared spectral reflectance measurements (0.65-2.5 μm) and a 0.325-5 μm summary. *Icarus*, 41(3), 323–339.

Collings, M., Dever, J., Fraser, H., McCoustra, M., et Williams, D. (2003). Carbon monoxide entrapment in interstellar ice analogs. *Astrophys. J.*, 583, 1058–1062.

Collins, G. C., Head, J. W., Pappalardo, R. T., et Spaun, N. A. (2000). Evaluation of

models for the formation of chaotic terrain on Europa. *J. Geophys. Res.*, 105(E1), 1709–1716.

Combe, J., L., L., Carrère, V., Despan, D., Méléder, V., Barillé, L., et Sotin, C. (2005). Mapping microphytobenthos biomass by non-linear inversion of visible-infrared hyperspectral images. *Remote Sensing of Environment*, 98(4), 371 – 387. doi :DOI : 10.1016/j.rse.2005.07.010.

Combe, J. P. (2005). *Études des surfaces planétaires par télédédection visible-infrarouge hyperspectrale*. Ph.D. thesis, Mécanique, thermique et génie civil.

Cooper, J. F., Johnson, R. E., Mauk, B. H., Garrett, H. B., et Gehrels, N. (2001). Energetic ion and electron irradiation of the icy galilean satellites. *Icarus*, 149(1), 133–159.

Coradini, A., Tosi, F., Gavrishin, A., Capaccioni, F., Cerroni, P., Filacchione, G., Adriani, A., Brown, R., Bellucci, G., Formisano, V., D'Aversa, E., Lunine, J., Baines, K., Bibring, J.-P., Buratti, B., Clark, R., Cruikshank, D., Combes, M., Drossart, P., Jaumann, R., Langevin, Y., Matson, D., McCord, T., Mennella, V., Nelson, R., Nicholson, P., Sicardy, B., Sotin, C., Hedman, M., Hansen, G., Hibbitts, C., Showalter, M., Griffith, C., et Strazzulla, G. (2008). Identification of spectral units on phoebe. *Icarus*, 193(1), 233–251.

Coustenis, A., Tokano, T., Burger, M., Cassidy, T., Lopes, R., Lorenz, R., Retherford, K., et Schubert, G. (2010-02-15). Atmospheric/Exospheric characteristics of icy satellites. *Space Science Reviews*, pp. 1–30.

Crawford, G. D. et Stevenson, D. J. (1988). Gas-driven water volcanism and the resurfacing of Europa. *Icarus*, 73(1), 66–79.

Cruikshank, D. (1998). Laboratory astrophysics in solar system studies : An overview. *Earth, Moon, and Planets*, 80(1), 3–33.

Cruikshank, D. P., Dalton, J. B., Ore, C. M. D., Bauer, J., Stephan, K., Filacchione, G., Hendrix, A. R., Hansen, C. J., Coradini, A., Cerroni, P., Tosi, F., Capaccioni, F., Jaumann, R., Buratti, B. J., Clark, R. N., Brown, R. H., Nelson, R. M., McCord, T. B., Baines, K. H., Nicholson, P. D., Sotin, C., Meyer, A. W., Bellucci, G., Combes, M., Bibring, J.-P., Langevin, Y., Sicardy, B., Matson, D. L., Formisano, V., Drossart, P., et Mennella, V. (2007). Surface composition of Hyperion. *Nature*, 448(7149), 54–56.

Cruikshank, D. P., Meyer, A. W., Brown, R. H., Clark, R. N., Jaumann, R., Stephan, K., Hibbitts, C. A., Sandford, S. A., Mastrapa, R. M., Filacchione, G., Ore, C. M. D., Nicholson, P. D., Buratti, B. J., McCord, T. B., Nelson, R. M., Dalton, J. B., Baines, K. H., et Matson, D. L. (2010). Carbon dioxide on the satellites of Saturn : results from the Cassini VIMS investigation and revisions to the VIMS wavelength scale. *Icarus*, 206(2), 561–572.

Cruikshank, D. P., Owen, T. C., Ore, C. D., Geballe, T. R., Roush, T. L., de Bergh, C., Sandford, S. A., Poulet, F., Benedix, G. K., et Emery, J. P. (2005). A spectroscopic study of the surfaces of Saturn's large satellites : H_2O ice, tholins, and minor constituents. *Icarus*, 175(1), 268–283.

Cruikshank, D. P., Roush, T. L., Owen, T. C., Geballe, T. R., de Bergh, C., Schmitt, B., Brown, R. H., et Bartholomew, M. J. (1993). Ices on the surface of Triton. *Science*, 261(5122), 742–745.

Cruikshank, D. P., Wegryn, E., Dalle Ore, C., Brown, R., Bibring, J.-P., Buratti, B., Clark, R., McCord, T., Nicholson, P., Pendleton, Y., Owen, T., Filacchione, G., Co-

radini, A., Cerroni, P., Capaccioni, F., Jaumann, R., Nelson, R., Baines, K., Sotin, C., Bellucci, G., Combes, M., Langevin, Y., Sicardy, B., Matson, D., Formisano, V., Drossart, P., et Mennella, V. (2008). Hydrocarbons on saturn's satellites iapetus and phoebe. *Icarus*, 193(2), 334–343.

Dalton, J. (2010). Spectroscopy of icy moon surface materials. *Space Science Reviews*, 153, 1–29.

Dalton, J., Cruikshank, D., Stephan, K., McCord, T., Coustenis, A., Carlson, R., et Coradini, A. (2010). Chemical composition of icy satellite surfaces. *Space Science Reviews*, pp. 1–42.

Dalton, J., Prieto-Ballesteros, O., Kargel, J., Jamieson, C., Jolivet, J., et Quinn, R. (2005). Spectral comparison of heavily hydrated salts with disrupted terrains on Europa. *Icarus*, 177(2), 472–490.

Dalton, J. B. I. (2007). Linear mixture modeling of Europa's non-ice material based on cryogenic laboratory spectroscopy. *Geophys. Res. Lett.*, 34(21), L21205.

Dartois, E., Demyk, K., d'Hendecourt, L., et Ehrenfreund, P. (1999). Carbon dioxide-methanol intermolecular complexes in interstellar grain mantles. *Astron. Astrophys.*, 351, 1066–1074.

Dartois, E. et Schmitt, B. (2009). Carbon dioxide clathrate hydrate FTIR spectrum. *A&A*, 504(3), 869–873. doi :10.1051/0004-6361/200911812.

Datchi, F., Giordano, V., Munsch, P., et Saitta, A. (2009). Structure of carbon dioxide phase IV : breakdown of the intermediate bonding state scenario. *Phys. Rev. Lett.*, 103, 185701.

Davidson, D. (1971). The motion of guest molecules in clathrate hydrates. *Canadian Journal of Chemistry*, 49, 1224.

Davidson, D. W., Handa, Y. P., Ratcliffe, C. I., Tse, J. S., et Powell, B. M. (1984). The ability of small molecules to form clathrate hydrates of structure II. *Nature*, 311(5982), 142–143.

De Sitter, W., Gill, D., et Finlay, W. H. (1915). Determination of the mass of Jupiter and elements of the orbits of its satellites. *Annals of the Cape Observatory*, 12, 1–1 173.

Delitsky, M. L. et Lane, A. L. (1998). Ice chemistry on the galilean satellites. *J. Geophys. Res.*, 103(E13), 31391–31403.

Delitsky, M. L. et Lane, A. L. (2002). Saturn's inner satellites : ice chemistry and magnetosphere effects. *J. Geophys. Res.*, 107(E11), 5093.

Delsemme, A. H. (1988). The chemistry of comets. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. The Solar System : Chemistry as a Key to Its Origin*, 325(1587), 509–523.

Dougherty, M. K., Kellock, S., Southwood, D. J., Balogh, A., Smith, E. J., Tsurutani, B. T., Gerlach, B., Glassmeier, K.-H., Gleim, F., Russell, C. T., Erdos, G., Neubauer, F. M., et Cowley, S. W. H. (2004). The Cassini magnetic field investigation. *Space Science Reviews*, 114(1), 331–383.

Durham, W., Kirby, S., et Stern, L. (1998). Rheology of planetary ices. In B. Schmitt, C. de Bergh, et F. M., eds., *Solar System Ices*, *Astrophysics and Space Science Library*, volume 227, p. 63.

Durham, W., McDaniel, S., Stern, L., et Kirby, S. (2003a). Ice rheology in the planetary context. *European Geophys. Soc.*, 5, 12592.

Durham, W. et Stern, L. (2001). Rheological properties of water ice-applications to satellites of the outer planets. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 29, 295–330. doi :10.1146/annurev.earth.29.1.295.

Durham, W. B., Kirby, S. H., Stern, L. A., et Zhang, W. (2003b). The strength and rheology of methane clathrate hydrate. *J. Geophys. Res.*, 108(B4), 2182.

Ehrenfreund, P., Boogert, A., Gerakines, P., Jansen, D., Schutte, W., Tielens, A., et van Dishoeck, E. (1996). A laboratory database of solid CO and CO_2 for ISO. *Astron. Astrophys.*, 315, L341–L344.

Ehrenfreund, P., d'Hendecourt, L., Dartois, E., Jourdain de Muizon, M., Breitfellner, M., Puget, J. L., et Habing, H. J. (1997). ISO observations of interstellar ices and implications for comets. *Icarus*, 130(1), 1–15.

Ehrenfreund, P., Kerkhof, O., Schutte, W., Boogert, A., Gerakines, P., Dartois, E., D'Hendecourt, L., Tielens, A., van Dishoeck, E., et Whittet, D. (1999). Laboratory studies of thermally processed H_2O-CH_3OH-CO_2 ice mixtures and their astrophysical implications. *Astron. Astrophys.*, 350, 240–253.

Eisenberg, D. et Kauzmann, W. (1969). The structure and properties of water. *Oxford University Press, London,*, 296, 70.

Elachi, C., Allison, M. D., Borgarelli, L., Encrenaz, P., Im, E., Janssen, M. A., Johnson, W. T. K., Kirk, R. L., Lorenz, R. D., Lunine, J. I., Muhleman, D. O., Ostro, S. J., Picardi, G., Posa, F., Rapley, C. G., Roth, L. E., Seu, R., Soderblom, L. A., Vetrella,

S., Wall, S. D., Wood, C. A., et Zebker, H. A. (2004). Radar : the Cassini Titan Radar mapper. *Space Science Reviews*, 115(1), 71–110.

Ellis, J. W. (1931). Polymers and new infrared absorption bands of water. *Phys. Rev.*, 38(4), 693.

Emery, J. P., Burr, D. M., Cruikshank, D. P., Brown, R. H., et Dalton, J. B. (2005). Near-infrared (0.8 - 4.0 μm) spectroscopy of Mimas, Enceladus, Tethys, and Rhea. *A&A*, 435(1), 353–362.

Emslie, A. G. et Aronson, J. R. (1973). Spectral reflectance and emittance of particulate materials. 1 : Theory. *Appl. Opt.*, 12(11), 2563–2572.

Esposito, L. W., Barth, C. A., Colwell, J. E., Lawrence, G. M., McClintock, W. E., Stewart, A. I. F., Keller, H. U., Korth, A., Lauche, H., Festou, M. C., Lane, A. L., Hansen, C. J., Maki, J. N., West, R. A., Jahn, H., Reulke, R., Warlich, K., Shemansky, D. E., et Yung, Y. L. (2004). The Cassini UltraViolet Imaging Spectrograph investigation. *Space Science Reviews*, 115(1), 299–361.

Eviatar, A., Siscoe, G. L., Johnson, T. V., et Matson, D. L. (1981). Effects of io ejecta on Europa. *Icarus*, 47(1), 75–83.

Fagents, S., Kadel, S., Greeley, R., Kirk, R., et Team, G. S. (1998). Styles of cryovolcanism on Europa : summary of evidence from the Galileo nominal mission. In *Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts*, *Lunar and Planetary Inst. Technical Report*, volume 29, p. 1721.

Fagents, S. A., Greeley, R., Sullivan, R. J., Pappalardo, R. T., Prockter, L. M., et Team,

T. G. S. (2000). Cryomagmatic mechanisms for the formation of rhadamanthys linea, triple band margins, and other low-albedo features on Europa. *Icarus*, 144(1), 54–88.

Fan, X., Bing, D., Zhang, J., Shen, Z., et Kuo, J.-L. (2010). Predicting the hydrogen bond ordered structures of ice Ih, II, III, VI and ice VII : DFT methods with localized based set. *Computational Materials Science*, In Press, Corrected Proof. doi :10.1016/j.commatsci.2010.04.004.

Fanale, F. P., Granahan, J. C., Greeley, R., Pappalardo, R., Head, J., Shirley, J., Carlson, R., Hendrix, A., Moore, J., McCord, T. B., Belton, M., the Galileo NIMS, et Teams, S. I. (2000). Tyre and Pwyll : Galileo orbital remote sensing of mineralogy versus morphology at two selected sites on Europa. *J. Geophys. Res.*, 105(E9), 22647–22655.

Fanale, F. P., Granahan, J. C., McCord, T. B., Hansen, G., Hibbitts, C. A., Carlson, R., Matson, D., Ocampo, A., Kamp, L., Smythe, W., Leader, F., Mehlman, R., Greeley, R., Sullivan, R., Geissler, P., Barth, C., Hendrix, A., Clark, B., Helfenstein, P., Veverka, J., Belton, M. J. S., Becker, K., Becker, T., et SSI, t. G. N., UVS instrument teams (1999). Galileo's multiinstrument spectral view of Europa's surface composition. *Icarus*, 139(2), 179–188.

Farrell, E. et Newnham, R. (1967). Electronic and vibrational absorption spectra in cordierite. *American Mineralogist*, 52, 380–388.

Figueredo, P., Chuang, F., Kirk, R., et Greeley, R. (2000). Evidence for a cryovolcanic origin of Europa's « mitten » feature. In *Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts*, *Lunar and Planetary Inst. Technical Report*, volume 31, p. 1026.

Figueredo, P. H. et Greeley, R. (2000). Geologic mapping of the northern leading hemisphere of Europa from Galileo solid-state imaging data. *J. Geophys. Res.*, 105(E9), 22629–22646.

Filacchione, G., Capaccioni, F., McCord, T., Coradini, A., Cerroni, P., Bellucci, G., Tosi, F., D'Aversa, E., Formisano, V., Brown, R., Baines, K., Bibring, J., Buratti, B., Clark, R., Combes, M., Cruikshank, D., Drossart, P., Jaumann, R., Langevin, Y., Matson, D., Mennella, V., Nelson, R., Nicholson, P., Sicardy, B., Sotin, C., Hansen, G., Hibbitts, K., Showalter, M., et Newman, S. (2007). Saturn's icy satellites investigated by Cassini-VIMS : I. Full-disk properties : 350-5100 nm reflectance spectra and phase curves. *Icarus*, 186(1), 259–290.

Filacchione, G., Capaccioni, F., Tosi, F., Cerroni, P., McCord, T., Baines, K., Bellucci, G., Brown, R., Buratti, B., Clark, R., Cruikshank, D., Cuzzi, J., Jaumann, R., Stephan, K., Matson, D., Nelson, R., et Nicholson, P. (2008). Analysis of the saturnian icey satellites full-disk spectra by Cassini-VIMS. In *Saturn after Cassini-Huygens*. London.

Fine, G. et Stolper, E. (1986). Dissolved carbon dioxide in basaltic glasses : concentrations and speciation. *Earth and Planetary Science Letters*, 76(3-4), 263–278.

Fink, U., Dekkers, N., et Larson, H. (1973). Infrared spectra of the galilean satellites of Jupiter. *Astrophysical Journal*, 179, L155. doi :10.1086/181139.

Fink, U. et Larson, H. P. (1975). Temperature dependence of the water-ice spectrum between 1 and 4 microns : application to Europa, Ganymede and Saturn's rings. *Icarus*, 24(4), 411–420.

Fink, U. et Sill, G. (1982). The infrared spectral properties of frozen volatiles. In L.L.Wilkening, ed., *IAU Colloq. 61 : Comet Discoveries, Statistics, and Observational Selection*, pp. 164–202. University of Arizona Press, Tucson.

Flasar, F. M., Kunde, V. G., Abbas, M. M., Achterberg, R. K., Ade, P., Barucci, A., Bézard, B., Bjoraker, G. L., Brasunas, J. C., Calcutt, S., Carlson, R., Césarsky, C. J., Conrath, B. J., Coradini, A., Courtin, R., Coustenis, A., Edberg, S., Edgington, S., Ferrari, C., Fouchet, T., Gautier, D., Gierasch, P. J., Grossman, K., Irwin, P., Jennings, D. E., Lellouch, E., Mamoutkine, A. A., Marten, A., Meyer, J. P., Nixon, C. A., Orton, G. S., Owen, T. C., Pearl, J. C., Prangé, R., Raulin, F., Read, P. L., Romani, P. N., Samuelson, R. E., Segura, M. E., Showalter, M. R., Simon-Miller, A. A., Smith, M. D., Spencer, J. R., Spilker, L. J., et Taylor, F. W. (2004). Exploring the Saturn system in the thermal infrared : the Composite InfraRed Spectrometer. *Space Science Reviews*, 115(1), 169–297.

Fukazawa, H., Mae, S., Ikeda, S., et Watanabe, O. (1998). Proton ordering in Antarctic ice observed by Raman and neutron scattering. *Chem. Phys. Lett.*, 294, 554–558.

Gaidos, E. J., Nealson, K. H., et Kirschvink, J. L. (1999). Biogeochemistry : life in ice-covered oceans. *Science*, 284(5420), 1631–1633.

Gàlvez, O., Maté, B., Herrero, V. J., et Escribano, R. (2008). Trapping and adsorption of CO_2 in amorphous ice : a FTIR study. *Icarus*, 197(2), 599–605.

Gàlvez, O., Ortega, I., Maté, B., Moreno, M., Martin-Llorente, B., Herrero, J., Escribano, R., et Gutierrez, P. (2007). A study of the interaction of CO_2 with water ice. *Astronomy and Astrophysics*, 472, 691–698.

Geissler, P. E., Greenberg, R., Hoppa, G., McEwen, A., Tufts, R., Phillips, C., Clark, B., Ockert-Bell, M., Helfenstein, P., Burns, J., Veverka, J., Sullivan, R., Greeley, R., Pappalardo, R. T., Head, J. W., Belton, M. J. S., et Denk, T. (1998). Evolution of lineaments on Europa : clues from Galileo multispectral imaging observations. *Icarus*, 135(1), 107–126.

Gerakines, P., Schutte, W., Greenberg, J., et van Discoeck, E. (1995). The infrared band strengths of H_2O, CO and CO_2 in laboratory simulations of astrophysical ice mixtures. *Astronomy and Astrophysics*, 296, 810–818.

Gerakines, P. A., Whittet, D., Ehrenfreund, P., Boogert, A., Tielens, A., Schutte, W., Chiar, J., van Dishoeck, E., Prusti, T., Helmich, F., et de Graauw, T. (1999). Observations of solid carbon dioxide in molecular clouds with the Infrared Space Observatory. *The Astrophysical Journal*, 522(1), 357.

Goodman, J. C., Collins, G. C., Marshall, J., et Pierrehumbert, R. T. (2004). Hydrothermal plume dynamics on Europa : implications for chaos formation. *J. Geophys. Res.*, 109(E3), E03008.

Greeley, R. (1997). Geology of Europa : Galileo update. In C. e. a. Barbieri, ed., *The three Galileos : The Man, the Spacecraft, the Telescope*, pp. 191–200. Kluwer Academy.

Greeley, R., Figueredo, P., Williams, D., Chuang, F., Klemaszewski, J., Kadel, S., Prockter, L., Pappalardo, R., Head, J. W., Collins, G., Spaun, N., Sullivan, R., Moore, J., Senske, D., Tufts, B. R., Johnson, T., Belton, M., et Tanaka, K. (2000). Geologic mapping of Europa. *J. Geophys. Res.*, 105(E9), 22559–22578.

Greeley, R., Sullivan, R., Klemaszewski, J., Homan, K., Head, J. W., Pappalardo, R. T., Veverka, J., Clark, B. E., Johnson, T. V., Klaasen, K. P., Belton, M., Moore, J., Asphaug, E., Carr, M. H., Neukum, G., Denk, T., Chapman, C. R., Pilcher, C. B., Geissler, P. E., Greenberg, R., et Tufts, R. (1998). Europa : initial Galileo geological observations. *Icarus*, 135(1), 4–24.

Greenberg, R., Geissler, P., Hoppa, G., Tufts, B. R., Durda, D. D., Pappalardo, R., Head, J. W., Greeley, R., Sullivan, R., et Carr, M. H. (1998). Tectonic processes on Europa : tidal stresses, mechanical response, and visible features. *Icarus*, 135(1), 64–78.

Greenberg, R., Hoppa, G. V., Tufts, B. R., Geissler, P., Riley, J., et Kadel, S. (1999). Chaos on Europa. *Icarus*, 141(2), 263–286.

Grundy, W. M., Buie, M. W., Stansberry, J. A., Spencer, J. R., et Schmitt, B. (1999). Near-infrared spectra of icy outer solar system surfaces : remote determination of H_2O ice temperatures. *Icarus*, 142(2), 536–549.

Grundy, W. M. et Schmitt, B. (1998). The temperature-dependent near-infrared absorption spectrum of hexagonal H_2O-ice. *Journal of Geophysical Research*, 103, 25809–25822.

Gurnett, D. A., Kurth, W. S., Kirchner, D. L., Hospodarsky, G. B., Averkamp, T. F., Zarka, P., Lecacheux, A., Manning, R., Roux, A., Canu, P., Cornilleau-Wehrlin, N., Galopeau, P., Meyer, A., Boström, R., Gustafsson, G., Wahlund, J.-E., Åhlen, L., Rucker, H. O., Ladreiter, H. P., Macher, W., Woolliscroft, L. J. C., Alleyne, H., Kaiser, M. L., Desch, M. D., Farrell, W. M., Harvey, C. C., Louarn, P., Kellogg, P. J., Goetz, K., et Pedersen, A. (2004). The Cassini Radio and Plasma Wave investigation. *Space Science Reviews*, 114(1), 395–463.

Hage, W., Liedl, K. R., Hallbrucker, A., et Mayer, E. (1998). Carbonic acid in the gas phase and its astrophysical relevance. *Science*, 279(5355), 1332–1335.

Hagen, W., Tielens, A., et Greenberg, J. (1981). The infrared spectra of amorphous solid water and ice Ic between 10 and 140 K. *Chemical Physics*, 56(3), 367–379.

Hagen, W. et Tielens, A. G. G. M. (1982). The librational region in the spectrum of amorphous solid water and ice Ic between 10 and 140 K. *Spectrochimica Acta Part A : Molecular Spectroscopy*, 38(10), 1089–1094.

Hall, D., Feldman, P., McGrath, M., et F., S. D. (1998). The far-ultraviolet oxygen airglow of Europa and Ganymede. *The Astrophysical Journal*, 499, 475–481.

Hansen, C. J., Esposito, L., Stewart, A. I. F., Colwell, J., Hendrix, A., Pryor, W., Shemansky, D., et West, R. (2006). Enceladus' water vapor plume. *Science*, 311(5766), 1422–1425.

Hansen, G. et McCord, T. (2004). Amorphous and crystalline ice on the galilean satellites : A balance between thermal and radiolytic processes. *Journal of Geophysical Research*, 109, E001012.

Hansen, G. B. (1997). The infrared absorption spectrum of carbon dioxide ice from 1.8 to 333 μm. *J. Geophys. Res.*, 102(E9), 21569–21587.

Hapke, B. (1981). Bidirectional reflectance spectroscopy 1. Theory. *J. Geophys. Res.*, 86(B4), 3039–3054.

Hapke, B. (1993). *Reflectance and emittance spectroscopy*. Cambridge University Press.

Harris, D. (1961). *Planets and satellites*. University of Chicago Press, Chicago, 172 pp.

Head, J., Pappalardo, R., Collins, G., Greeley, R., et Team, G. I. (1997). Tectonic resurfacing on Ganymede and its role in the formation of grooved terrain. In *Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts*, *Lunar and Planetary Inst. Technical Report*, volume 28, p. 535.

Head, J., Pappalardo, R., Prockter, L., Spaun, N., Collins, G., Greeley, R., Klemaszewski, J., Sullivan, R., Chapman, C., et Team, G. S. (1999a). Europa : recent geological history from Galileo observations. In *Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts*, *Lunar and Planetary Inst. Technical Report*, volume 30, p. 1404.

Head, J., Pappalardo, R., Spaun, N., Prockter, L., et Collins, G. (1999b). Chaos terrain on Europa : characterization from Galileo E12 very high-resolution images of Conamara chaos : 2. matrix. In *Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts*, *Lunar and Planetary Inst. Technical Report*, volume 30, p. 1587.

Head, J. et Pappalardo, R. T. (1999). Brine mobilization during lithospheric heating on Europa : implications for formation of chaos terrain, lenticula texture, and color variations. *J. Geophys. Res.*, 104(E11), 27143–27155.

Head, J., Pappalardo, R. T., et Sullivan, R. (1999c). Europa : morphological characteristics of ridges and triple bands from Galileo data (E4 and E6) and assessment of a linear diapirism model. *J. Geophys. Res.*, 104(E10), 24223–24236.

Helfenstein, P., Currier, N., Clark, B. E., Veverka, J., Bell, M., Sullivan, R., Klemaszewski, J., Greeley, R., Pappalardo, R. T., Head, J. W., Jones, T., Klaasen, K., Magee,

K., Geissler, P., Greenberg, R., McEwen, A., Phillips, C., Colvin, T., Davies, M., Denk, T., Neukum, G., et Belton, M. J. S. (1998). Galileo observations of Europa's opposition effect. *Icarus*, 135(1), 41–63.

Hemley, R. J., Jephcoat, A. P., Mao, H. K., Zha, C. S., Finger, L. W., et Cox, D. E. (1987). Static compression of H_2O-ice to 128 GPa (1.28 Mbar). *Nature*, 330(6150), 737–740.

Hendrix, A. R., Barth, C. A., et Hord, C. W. (1999). Ganymede's ozone-like absorber : observations by the Galileo ultraviolet spectrometer. *J. Geophys. Res.*, 104(E6), 14169–14178.

Herr, K. C. et Pimentel, G. C. (1969). Infrared absorptions near three microns recorded over the polar cap of mars. *Science*, 166(3904), 496–499.

Hersant, F., Gautier, D., et Lunine, J. I. (2004). Enrichment in volatiles in the giant planets of the solar system. *Planetary and Space Science*, 52(7), 623–641.

Herschel, W. (1790). Account of the discovery of a sixth and seventh satellite of the planet Saturn, with remarks on the construction of its ring, its atmosphere, its rotation on an axis, and its spheroidical figure,. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 80, 1âĂŞ20.

Hibbitts, C., Stephan, K., Collins, G., et Hansen, G. (2009). Composition and distribution of nonice and trace materials on Ganymede as derived from Galileo observations. In *EPSC2009-632*.

Hibbitts, C. et Szanyi, J. (2007). Physisorption of CO_2 on non-ice materials relevant to icy satellites. *Icarus*, 191(1), 371–380.

Hibbitts, C. A., Klemaszewski, J. E., McCord, T. B., Hansen, G. B., et Greeley, R. (2002). CO_2-rich impact craters on Callisto. *J. Geophys. Res.*, 107(E10), 5084.

Hibbitts, C. A., McCord, T. B., et Hansen, G. B. (2000). Distributions of CO_2 and SO_2 on the surface of Callisto. *J. Geophys. Res.*, 105(E9), 22541–22557.

Hibbitts, C. A., McCord, T. B., et Hansen, G. B. (2001). The non-ice material on Callisto. In *American Geophysical Union, Fall Meeting 2001, abstract P12B-0495*, volume B495.

Hibbitts, C. A., Pappalardo, R. T., Hansen, G. B., et McCord, T. B. (2003). Carbon dioxide on Ganymede. *J. Geophys. Res.*, 108(E5), 5036.

Hirsch, K. et Holzapfel, W. (1984). Symmetric hydrogen bonds in ice X. *Phys. Lett. A*, 101, 142–144.

Hodyss, R., Johnson, P. V., Orzechowska, G. E., Goguen, J. D., et Kanik, I. (2008). Carbon dioxide segregation in $1:4$ and $1:9$ $CO_2:H_2O$ ices. *Icarus*, 194(2), 836–842.

Hohenberg, C., Thonnard, N., et Meshik, A. (2002). Active capture and anomalous adsorption : new mechanisms for the incorporation of heavy noble gases. *Meteoritics and Planetary Science*, 37, 257–267.

Hollingsworth Smith, P. (1978). Diameters of the galilean satellites from pioneer data. *Icarus*, 35(2), 167–176.

Hunt, G. et Salisbury, J. (1970). Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks : I. Silicate minerals. *Modern Geology*, 1, 283–300.

Ip, W., Williams, D. J., McEntire, R. W., et Mauk, B. H. (1998). Ion sputtering and surface erosion at Europa. *Geophys. Res. Lett.*, 25(6), 829–832.

Iro, N., Gautier, D., Hersant, F., Bockelée-Morvan, D., et Lunine, J. I. (2003). An interpretation of the nitrogen deficiency in comets. *Icarus*, 161(2), 511–532.

Jacox, M. E. et Milligan, D. E. (1961). The infrared spectra of thick films of CO_2 and CO_2 + H_2O at low temperatures. *Spectrochimica Acta*, 17(11), 1196–1202.

James, P. B., Kieffer, H. H., et Paige, D. A. (1992). The seasonal cycle of carbon dioxide on Mars. In H. Kieffer, B. Jakosky, C. Snyder, et M. Matthews, eds., *Mars*, p. 934âĂŞ968.

Jaumann, R., Clark, R. N., Nimmo, F., Hendrix, A. R., Buratti, B. J., Denk, T., Moore, J. M., Schenk, P. M., Ostro, S. J., et Srama, R. (2009). *Icy Satellites : geological Evolution and Surface Processes*, chapter 20, pp. 637–681. Springer Netherlands.

Jaumann, R., Stephan, K., Hansen, G., Clark, R., Buratti, B., Brown, R., Baines, K., Newman, S., Bellucci, G., Filacchione, G., Coradini, A., Cruikshank, D., Griffith, C., Hibbitts, C., McCord, T., Nelson, R., Nicholson, P., Sotin, C., et Wagner, R. (2008). Distribution of icy particles across Enceladus' surface as derived from Cassini-VIMS measurements. *Icarus*, 193(2), 407–419. doi :DOI : 10.1016/j.icarus.2007.09.013. Saturn's Icy Satellites from Cassini.

Jeffrey, G. (1984a). Hydrate inclusion compounds. In J. Atwood, J. Davies, et D. MacNichol, eds., *Inclusion Compounds*, volume 1, p. 135. Acad. Press.

Jeffrey, G. et McMullan, R. (1967). The clathrate hydrates. *Prog. Inorg. Chem.*, 8, 43.

Jeffrey, G. A. (1984b). Hydrate inclusion compounds. *Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry*, 1, 211–222. 10.1007/BF00656757.

Jenniskens, P., Banham, S., Blake, D., et McCoustra, M. (1997). Liquid water in the domain of cubic crystalline ice Ic. *J. Chem. Phys.*, 107, 1232.

Jenniskens, P. et Blake, D. (1994). Structural transitions in amorphous water ice and astrophysical implications. *Science*, 265(5173), 753–756.

Jenniskens, P., Blake, D., et Kouchi, A. (1998). Amorphous water ice. a solar system material. In M. B.Schmitt, C.de Bergh, ed., *Solar System Ices*, *Astrophysics and Space Science Library*, volume 227, p. 139. Kluwer Academic Publishers.

Johnson, R. E. (1985). Polar frost formation on Ganymede. *Icarus*, 62(2), 344–347.

Johnson, R. E. (1997). Polar « Caps » on Ganymede and Io revisited. *Icarus*, 128(2), 469–471.

Johnson, R. E. et Jesser, W. A. (1997). O_2/O_3 microatmospheres in the surface of Ganymede. *The Astrophysical Journal Letters*, 480(1), L79.

Johnson, R. E., Leblanc, F., Yakshinskiy, B. V., et Madey, T. E. (2002). Energy distributions for desorption of sodium and potassium from ice : the Na/K ratio at Europa. *Icarus*, 156(1), 136–142.

Johnson, T. et McCord, T. (1971). Spectral geometric albedo of the galilean satellites, 0.3 to 2.5 μm. *Astrophysical Journal*, 169, 589. doi :10.1086/151177.

Johnson, T., Yeates, C., Young, R., et Dunne, J. (1991). The galileo Venus encounter. *Science*, 253(5027), 1516–1518.

Juergens, D. W., Duval, J. E., Lockhart, R. F., Langevin, Y., Formisano, V., et Bellucci, G. (1991). Visible and infrared mapping spectrometer for exploration of comets, asteroids, and the saturnian system of rings and moons. *International Journal of Imaging Systems and Technology*, 3(2), 108–120.

Kadel, S., Fagents, S., Greeley, R., et Team, G. S. (1998). Trough-bounding ridge pairs on Europa - considerations for an endogenic model of formation. In *Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts*, *Lunar and Planetary Inst. Technical Report*, volume 29, p. 1078.

Kadel, S. D., Chuang, F. C., Greeley, R., Moore, J. M., et Team, T. G. S. (2000). Geological history of the tyre region of Europa : A regional perspective on europan surface features and ice thickness. *J. Geophys. Res.*, 105(E9), 22657–22669.

Kamb, B. et Davis, B. (1964). Ice VII, the densest form of ice. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 52, 1433–1439.

Kamb, B., Prakash, A., et Knobler, C. (1967). Structure of ice V. *Acta Crystallogr.*, 22, 706–715.

Kargel, J. (2001). Europa's aqueous and surface chemistry : *in situ* surface and orbital analysis. In *Eleventh Annual V. M. Goldschmidt Conference*, p. 3147.

Kargel, J. et Lunine, J. (1998). Clathrate hydrates on Earth and in the solar system. In C. de Bergh, M. Festou, et B. Schmitt, eds., *Solar System ices*, pp. 97–117. Kluwer Academic Publishers.

Kargel, J. S. (1991). Brine volcanism and the interior structures of asteroids and icy satellites. *Icarus*, 94(2), 368–390.

Kargel, J. S. (2006). Enceladus : Cosmic gymnast, volatile miniworld. *Science*, 311(5766), 1389–1391.

Kargel, J. S., Kaye, J. Z., Head, J. W., Marion, G. M., Sassen, R., Crowley, J. K., Ballesteros, O. P., Grant, S. A., et Hogenboom, D. L. (2000). Europa's crust and ocean : Origin, composition, and the prospects for life. *Icarus*, 148(1), 226–265.

Kargel, J. S. et Lewis, J. S. (1993). The composition and early evolution of Earth. *Icarus*, 105(1), 1–25.

Kargel, J. S. et Pozio, S. (1996). The volcanic and tectonic history of Enceladus. *Icarus*, 119(2), 385–404.

Khurana, K. K., Pappalardo, R. T., Murphy, N., et Denk, T. (2007). The origin of Ganymede's polar caps. *Icarus*, 191(1), 193–202.

Kieffer, H. (1970). Spectral reflectance of CO_2âĂŘH_2O frosts. *J. Geophys. Res.*, 75(03), 501–509.

Kieffer, H. H. et Smythe, W. D. (1974). Frost spectra : Comparison with Jupiter's satellites. *Icarus*, 21(4), 506–512.

Kieffer, S. W., Lu, X., Bethke, C. M., Spencer, J. R., Marshak, S., et Navrotsky, A. (2006). A clathrate reservoir hypothesis for Enceladus' south polar plume. *Science*, 314(5806), 1764–1766.

Kivelson, M. G., Khurana, K. K., et Volwerk, M. (2002). The permanent and inductive magnetic moments of Ganymede. *Icarus*, 157(2), 507–522.

Kliore, A. J., Anderson, J. D., Armstrong, J. W., Asmar, S. W., Hamilton, C. L., Rappaport, N. J., Wahlquist, H. D., Ambrosini, R., Flasar, F. M., French, R. G., Iess, L.,

Marouf, E. A., et Nagy, A. F. (2004). Cassini radio science. *Space Science Reviews*, 115(1), 1–70.

Kouchi, A. et Kuroda, T. (1990). Amorphization of cubic ice by ultraviolet irradiation. *Nature*, 344(6262), 134–135.

Kouchi, A., Yamamoto, T., Kozasa, T., Kuroda, T., et J.M., G. (1994). Conditions for condensation and preservation of amorphous ice and crystallinity of astrophysical ices. *Astronomy and Astrophysics*, 290, 1009–1018.

Krimigis, S. M., Mitchell, D. G., Hamilton, D. C., Livi, S., Dandouras, J., Jaskulek, S., Armstrong, T. P., Boldt, J. D., Cheng, A. F., Gloeckler, G., Hayes, J. R., Hsieh, K. C., Ip, W.-H., Keath, E. P., Kirsch, E., Krupp, N., Lanzerotti, L. J., Lundgren, R., Mauk, B. H., McEntire, R. W., Roelof, E. C., Schlemm, C. E., Tossman, B. E., Wilken, B., et Williams, D. J. (2004). Magnetosphere imaging instrument (MIMI) on the Cassini mission to Saturn/Titan. *Space Science Reviews*, 114(1), 233–329.

Kubelka, P. et Munk, F. (1931). Ein beitrag zür optik der farbanstriche. *Z. Technichse Physik*, 12, 593–601.

Kuhs, W., Finney, J., Vettier, C., et Bliss, D. (1984). Structure and hydrogen ordering in ices VI, VII and VIII by neutron powder diffraction. *J. Chem. Phys*, 81, 3612–3623.

Kuiper, G. (1957). Infrared observations of planets and satellites. *Astronomical Journal*, 62, 245.

Kuskov, O. et Kronrod, V. (2005). Internal structure of Europa and Callisto. *Icarus*, 177(2), 550–569.

Lane, A. L., Nelson, R. M., et Matson, D. L. (1981). Evidence for sulphur implantation in Europa's UV absorption band. *Nature*, 292(5818), 38–39.

Larson, H. et Fink, U. (1972). Identification of carbon dioxide frost on the martian polar caps. *Astrophysical Journal*, 171, L91. doi :10.1086/180875.

Lebofsky, L. A. (1975). Stability of frosts in the solar system. *Icarus*, 25(2), 205–217.

Leto, G. et Baratta, G. (2003). Ly-alpha photon induced amorphization of Ic water ice at 16 K. effects and quantitative comparison with ion irradiation. *Astronomie and Astrophysics*, 397, 7–13. doi :10.1051/0004-6361 :20021473.

Leto, G., Gomis, O., et Strazzulla, G. (2005). The reflectance spectrum of water ice : Is the 1.65 μm msp peak a good temperature probe ? *Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplement*, 6, 57.

Lewis, J. S. (1971). Satellites of the outer planets : their physical and chemical nature. *Icarus*, 15(2), 174–185.

Lewis, J. S. (1972a). Low temperature condensation from the solar nebula. *Icarus*, 16(2), 241–252.

Lewis, J. S. (1972b). Metal/silicate fractionation in the solar system. *Earth Planet. Sci. Lett*, 15, 286–290.

Lide, D. R. (2005). CRC *Handbook of Chemistry and Physics (86th ed.)*. Boca Raton (FL) : CRC Press.

Londono, J., Kuhs, W., et Finney, J. (1993). Neutron diffraction studies of ices III and IX on under-pressure and recovered samples. *J. Chem. Phys.*, 98, 4878–4888.

Lopes, R., Buratti, B., et Hendrix, A. (2008). The Saturn system's icy satellites : new results from Cassini. *Icarus*, 193(2), 305–308.

Lucchitta, B. et Soderblom, L. (1986). The geology of Europe. In D. Morrison, ed., *Satellites of Jupiter*, pp. 521–555. University of Arizona Press, Tucson.

Lucey, P. G. (1998). Model near-infrared optical constants of olivine and pyroxene as a function of iron content. *J. Geophys. Res.*, 103(E1), 1703–1713.

Lunine, J. et Stevenson, D. (1985). Thermodynamics of clathrate hydrate at low and high pressures with application to the outer solar system. *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 58, 493–531. doi :10.1086/191050.

Lupo, M. J. et Lewis, J. S. (1979). Mass-radius relationships in icy satellites. *Icarus*, 40(2), 157–170.

Mastrapa, R., Bernstein, M., Sandford, S., Roush, T., Cruikshank, D., et Ore, C. D. (2008). Optical constants of amorphous and crystalline H_2O-ice in the near infrared from 1.1 to 2.6 μm. *Icarus*, 197(1), 307–320.

Mastrapa, R. et Brown, R. (2006). Ion irradiation of crystalline H_2O ice : effect on the 1.65 μm band. *Icarus*, 183, 207–214. doi :10.1016/j.icarus.2006.02.006.

Mastrapa, R. M., Sandford, S., Roush, T., Cruikshank, D., et Dalle Ore, C. (2009). Optical constants of amorphous and crystalline H_2O-ice : 2.5-22 μm (4000-455 cm^{-1}) optical constants of H_2O-ice. *The Astrophysical Journal*, 701(2), 1347.

McCollom, T. M. (1999). Methanogenesis as a potential source of chemical energy for primary biomass production by autotrophic organisms in hydrothermal systems on europa. *J. Geophys. Res.*, 104(E12), 30729–30742.

McCord, T. B., Carlson, R. W., Smythe, W. D., Hansen, G. B., Clark, R. N., Hibbitts, C. A., Fanale, F. P., Granahan, J. C., Segura, M., Matson, D. L., Johnson, T. V., et Martin, P. D. (1997). Organics and other molecules in the surfaces of Callisto and Ganymede. *Science*, 278(5336), 271–275.

McCord, T. B., Hansen, G. B., Clark, R. N., Martin, P. D., Hibbitts, C. A., Fanale, F. P., Granahan, J. C., Segura, M., Matson, D. L., Johnson, T. V., Carlson, R. W., Smythe, W. D., Danielson, G. E., et Team, T. N. (1998a). Non-water-ice constituents in the surface material of the icy galilean satellites from the Galileo near-infrared mapping spectrometer investigation. *J. Geophys. Res.*, 103(E4), 8603–8626.

McCord, T. B., Hansen, G. B., Combe, J.-P., et Hayne, P. (2010). Hydrated minerals on Europa's surface : an improved look from the Galileo NIMS investigation. *Icarus*, 209(2), 639–650.

McCord, T. B., Hansen, G. B., Fanale, F. P., Carlson, R. W., Matson, D. L., Johnson, T. V., Smythe, W. D., Crowley, J. K., Martin, P. D., Ocampo, A., Hibbitts, C. A., Granahan, J. C., et the NIMS Team (1998b). Salts on Europa's surface detected by Galileo's Near Infrared Mapping Spectrometer. *Science*, 280(5367), 1242–1245.

McCord, T. B., Hansen, G. B., et Hibbitts, C. A. (2001a). Hydrated salt minerals on Ganymede's surface : evidence of an ocean below. *Science*, 292(5521), 1523–1525.

McCord, T. B., Hansen, G. B., Matson, D. L., Johnson, T. V., Crowley, J. K., Fanale, F. P., Carlson, R. W., Smythe, W. D., Martin, P. D., Hibbitts, C. A., Granahan, J. C., et Ocampo, A. (1999). Hydrated salt minerals on Europa's surface from the Galileo near-infrared mapping spectrometer (NIMS) investigation. *J. Geophys. Res.*, 104(E5), 11827–11851.

McCord, T. B., Hayne, P., Combe, J.-P., Hansen, G. B., Barnes, J. W., Rodriguez, S., Le MouÃl'lic, S., Baines, E. K. H., Buratti, B. J., Sotin, C., Nicholson, P., Jaumann, R., Nelson, R., et the Cassini VIMS Team (2008). Titan's surface : Search for spectral diversity and composition using the cassini vims investigation. *Icarus*, 194(1), 212–242.

McCord, T. B., Orlando, T. M., Teeter, G., Hansen, G. B., Sieger, M. T., Petrik, N. G., et Van Keulen, L. (2001b). Thermal and radiation stability of the hydrated salt minerals epsomite, mirabilite, and natron under Europa environmental conditions. *J. Geophys. Res.*, 106(E2), 3311–3319.

McCord, T. B., Teeter, G., Hansen, G. B., Sieger, M. T., et Orlando, T. M. (2002). Brines exposed to Europa surface conditions. *J. Geophys. Res.*, 107(E1), 5004.

McGrath (2009). Atmosphere of Europa. In W. Pappalardo, R.T. ; McKinnon et K. Khurana, eds., *Europa*. University of Arizona Press.

McKay, C., Porco, C. C., Altheide, T., Davis, W., et Kral, T. (2008). The possible origin and persistence of life on Enceladus and detection of biomarkers in the plume. *Astrobiology*, 8, 909–919. doi :10.1089/ast.2008.0265.

McKinnon, W. B. (1999). Convective instability in Europa's floating ice shell. *Geophys. Res. Lett.*, 26(7), 951–954.

Meltzer, M. (2007). *MISSION TO* J*UPITER : a History of the* G*alileo Project*. NASA.

Miller, E. A., Klein, G., Juergens, D. W., Mehaffey, K., Oseas, J. M., Garcia, R. A., Giandomenico, A., Irigoyen, R. E., Hickok, R., Rosing, D., Sobel, H. R., Bruce, C. F., Jr., Flamini, E., DeVidi, R., Reininger, F. M., Dami, M., Soufflot, A., Langevin, Y., et

Huntzinger, G. (1996). The Visual and Infrared Mapping Spectrometer for Cassini. In *Proc. SPIE*, volume 2803, pp. 206–220. SPIE, Denver, CO, USA.

Miller, R. (2005). *The Grand Tour : a Traveler's Guide to the Solar System (3rd ed.)*. Workman Publishing.

Miller, S. (1961). The occurrence of gas hydrates in the solar system. *Proc Natl Acad Sci USA.*, 47(11), 1798âĂŞ1808.

Miller, S. (1985). Clathrate hydrates in the solar system. In J. Klinger, D. Benest, et A. Dollfus, eds., *Ices in the Solar System*, pp. 59–79. Reidel, Norwell, MA.

Moore, C., J. M.and Chapman, Bierhaus, E., Greeley, R., F.C., C., J., K., R.N., C., Dalton, B., Hibbitts, C., P.M., S., Spencer, J., et Wagner, R. (2004a). Callisto. In C. U. Press, ed., *Jupiter : The* P*lanet,* S*atellites and* M*agnetosphere.* Bagenal, F. and Dowling, T.E. and McKinnon, W.B.

Moore, J. M., Asphaug, E., Belton, M. J. S., Bierhaus, B., Breneman, H. H., Brooks, S. M., Chapman, C. R., Chuang, F. C., Collins, G. C., Giese, B., Greeley, R., Head, J. W., Kadel, S., Klaasen, K. P., Klemaszewski, J. E., Magee, K. P., Moreau, J., Morrison, D., Neukum, G., Pappalardo, R. T., Phillips, C. B., Schenk, P. M., Senske, D. A., Sullivan, R. J., Turtle, E. P., et Williams, K. K. (2001). Impact features on Europa : results of the Galileo Europa Mission (GEM). *Icarus*, 151(1), 93–111.

Moore, J. M., Schenk, P. M., Bruesch, L. S., Asphaug, E., et McKinnon, W. B. (2004b). Large impact features on middle-sized icy satellites. *Icarus*, 171(2), 421–443.

Moore, M. et Hudson, R. (1992). Far-infrared spectral studies of phase changes in

water ice induced by proton irradiation. *Astrophysical Journal*, 401, 353–360. doi : 10.1086/172065.

Moore, M. H., Khanna, R., et Donn, B. (1991). Studies of proton irradiated H_2O+CO_2 and H_2O+CO ices and analysis of synthesized molecules. *J. Geophys. Res.*, 96(E2), 17541–17545.

Moré, J. (1978). *The* L*evenberg*-M*arquardt algorithm : implementation and theory*, volume 630/1978. 105–116 pp.

Moroz, V. I. (1965). Infrared spectrophotometry of satellites : the moon and the galilean satellites of Jupiter. *Astron. Zh.*, 42, 1287.

Morrison, D., Morrison, N. D., et Lazarewicz, A. R. (1974). Four-color photometry of the galilean satellites. *Icarus*, 23(3), 399–416.

Murray, B. (2008). Enhanced formation of cubic ice in aqueous organic acid droplets. *Environ. Res. Lett.*, 3, 25008.

Murray, B. J. et Bertram, A. K. (2006). Formation and stability of cubic ice in water droplets. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 8(1), 186–192.

NASA (1990). Cassini mission : Saturn orbiter Visual and Infrared Mapping Spectrometer subsystem despcription. *Announcement of opportunity, OSSA-1-89, Proposal Information Package*, VII.

Nelson, R. M., Lane, A. L., Matson, D. L., Veeder, G. J., Buratti, B. J., et Tedesco, E. F. (1987). Spectral geometric albedos of the galilean satellites from 0.24 to 0.34 μm : observations with the international ultraviolet explorer. *Icarus*, 72(2), 358–380.

Newman, S. F., Buratti, B., Brown, R., Jaumann, R., Bauer, J., et Momary, T. (2008). Photometric and spectral analysis of the distribution of crystalline and amorphous ices on Enceladus as seen by Cassini. *Icarus*, 193(2), 397–406.

Newman, S. F., Buratti, B. J., Jaumann, R., Bauer, J. M., et Momary, T. W. (2007). Hydrogen peroxide on Enceladus. *The Astrophysical Journal Letters*, 670, L143.

Nicodemus, F. E. (1965). Directional reflectance and emissivity of an opaque surface. *Appl. Opt.*, 4(7), 767–773.

Nimmo, F. et Manga, M. (2002). Causes, characteristics and consequences of convective diapirism on Europa. *Geophys. Res. Lett.*, 29(23), 2109.

Nimmo, F. et Pappalardo, R. T. (2006). Diapir-induced reorientation of saturn's moon Enceladus. *Nature*, 441(7093), 614–616.

Nolin, A. W. et Dozier, J. (1993). Estimating snow grain size using AVIRIS data. *Remote Sensing of Environment*, 44(2-3), 231–238.

Nolin, A. W. et Dozier, J. (2000). A hyperspectral method for remotely sensing the grain size of snow. *Remote Sensing of Environment*, 74(2), 207–216.

Noll, K. S., Johnson, R. E., Lane, A. L., Domingue, D. L., et Weaver, H. A. (1996). Detection of ozone on Ganymede. *Science*, 273(5273), 341–343.

Notesco, G. et Bar-Nun, A. (1997). Trapping of methanol, hydrogen cyanide, andn-hexane in water ice, above its transformation temperature to the crystalline form. *Icarus*, 126(2), 336–341.

Ockman, N. (1958). The infrared and Raman spectra of ice. *Advances in Physics*, 7(26), 199–220.

Orlando, T. M., McCord, T. B., et Grieves, G. A. (2005). The chemical nature of Europa surface material and the relation to a subsurface ocean. *Icarus*, 177(2), 528–533.

Orton, G. S., Spencer, J. R., Travis, L. D., Martin, T. Z., et Tamppari, L. K. (1996). Galileo PhotoPolarimeter-Radiometer observations of Jupiter and the galilean satellites. *Science*, 274(5286), 389–391.

Owen, T. et Bar-Nun, A. (1995). Comets, impacts, and atmospheres. *Icarus*, 116(2), 215–226.

Owen, T. C., Cruikshank, D. P., Dalle Ore, C. M., Geballe, T. R., Roush, T. L., de Bergh, C., Meier, R., Pendleton, Y. J., et Khare, B. N. (2001). Decoding the domino : the dark side of Iapetus. *Icarus*, 149(1), 160–172.

Painter, T. H., Roberts, D. A., Green, R. O., et Dozier, J. (1998). The effect of grain size on spectral mixture analysis of snow-covered area from AVIRIS data. *Remote Sensing of Environment*, 65(3), 320–332.

Palmer, E. et Brown, R. (2006). Carbon dioxide transport on Iapetus. In S. Mackwell et E. Stansbery, eds., *37th Annual Lunar and Planetary Science Conference*, *Lunar and Planetary Inst. Technical Report*, volume 37, p. 2215.

Palmer, E. E. et Brown, R. H. (2007). A possible trace carbon dioxide polar cap on Iapetus. *The Astrophysical Journal Letters*, 666(2), L125.

Palmer, E. E. et Brown, R. H. (2008). The stability and transport of carbon dioxide on Iapetus. *Icarus*, 195(1), 434–446.

Palumbo, M. et Baratta, G. (2000). Infrared spectra of CO_2 in H_2O : CH_3OH : CO_2 icy mixtures. *Astron. Astrophys.*, 361, 298–302.

Pappalardo, R., Belton, M., Brenemen, H., Carr, M., Chapman, C., Collins, G., Denk, T., Fagens, S., Geissler, P., Giese, B., Greeley, R., Grennberg, R., Head, J., Helfenstein, P., Hoppa, G., Kadel, S., Klaasen, K., Klemaszewski, J., Magee, K., McEwen, A., Moore, J., Moore, W., Neukum, G., Phillips, C., Prockter, L., Schubert, G., Senke, D., Sullivan, R., Tufts, B., Turtle, E., Wagner, R., et Willams, K. (1999). Does Europa have a subsurface ocean ? Evaluation of the geological evidence. *Journal of Geophysical Research*, 104, 24015–24055.

Pappalardo, R., Khurana, K., et Moore, W. (2001). The grandeur of Ganymede : suggested goals for an orbiter mission. In *Lunar and Planetary Science XXXII : 4062*.

Pappalardo, R. T., Head, J. W., Greeley, R., Sullivan, R. J., Pilcher, C., Schubert, G., Moore, W. B., Carr, M. H., Moore, J. M., Belton, M. J. S., et Goldsby, D. L. (1998a). Geological evidence for solid-state convection in Europa's ice shell. *Nature*, 391(6665), 365–368.

Pappalardo, R. T., Khurana, K. K., Denk, T., Ip, W., Rosanova, T., McEwen, A. S., Johnson, T. V., Helfenstein, P. E., Head, J. W., Goyal, R., Warnecke, J., Kivelson, M. G., Neukum, G., Gaddis, L., Becker, T., Team, G. I., et Team, G. M. (1998b). A comparison of the plasma bombardment boundary on ganymede's surface to galileo imaging data. *Bull. Am. Astron. Soc.*, 30, 1120.

Parkinson, C., Liang, M., Yung, Y., et Kirschivnk, J. (2008). Habitability of Enceladus : planetary conditions for life. *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 38, 355–369. doi :10.1007/s11084-008-9135-4.

Passey, Q. R. (1983). Viscosity of the lithosphere of Enceladus,. *Icarus*, 53(1), 105–120.

Patel, J., Pappalardo, R., Prockter, L. M., Collins, G., Head, J., et the Galileo SSI Team. (1999). Morphology of ridge and trough terrain on Europa : Fourier analysis and comparison to Ganymede. *Eos Trans. AGU Sring Meeting Suppl.*, 80(17), S210.

Petrenko, V. et Whitworth, R. (1999). *Physics of ice*. Oxford Univ. Press.

Petterson, W., Head, J. W., Collins, G., Pappalardo, R., Prockter, L., et B.K., L. (2007). A global geologic map of Ganymede. In *Lunar and Planetary Science XXXVIII : 1098*.

Phillips, C. B., McEwen, A. S., Hoppa, G. V., Fagents, S. A., Greeley, R., Klemaszewski, J. E., Pappalardo, R. T., Klaasen, K. P., et Breneman, H. H. (2000). The search for current geologic activity on Europa. *J. Geophys. Res.*, 105(E9), 22579–22597.

Pilcher, C. B., Ridgway, S. T., et McCord, T. B. (1972). Galilean satellites : identification of water frost. *Science*, 178(4065), 1087–1089.

Pimentel, G., Forney, P., et Herr, K. (1974). Evidence about hydrate and solid water in the martian surface from the 1969 Mariner infrared spectrometer. *J. Geophys. Res.*, 79(11), 1623–1634.

Pollack, J. B., Witteborn, F. C., Erickson, E. F., Strecker, D. W., Baldwin, B. J., et Bunch, T. E. (1978). Near-infrared spectra of the galilean satellites : observations and compositional implications. *Icarus*, 36(3), 271–303.

Porco, C. C., Baker, E., Barbara, J., Beurle, K., Brahic, A., Burns, J. A., Charnoz, S., Cooper, N., Dawson, D. D., Del Genio, A. D., Denk, T., Dones, L., Dyudina, U., Evans, M. W., Fussner, S., Giese, B., Grazier, K., Helfenstein, P., Ingersoll, A. P., Jacobson, R. A., Johnson, T. V., McEwen, A., Murray, C. D., Neukum, G., Owen, W. M., Perry,

J., Roatsch, T., Spitale, J., Squyres, S., Thomas, P., Tiscareno, M., Turtle, E. P., Vasavada, A. R., Veverka, J., Wagner, R., et West, R. (2005). Imaging of Titan from the Cassini spacecraft. *Nature*, 434(7030), 159–168.

Porco, C. C., Helfenstein, P., Thomas, P. C., Ingersoll, A. P., Wisdom, J., West, R., Neukum, G., Denk, T., Wagner, R., Roatsch, T., Kieffer, S., Turtle, E., McEwen, A., Johnson, T. V., Rathbun, J., Veverka, J., Wilson, D., Perry, J., Spitale, J., Brahic, A., Burns, J. A., DelGenio, A. D., Dones, L., Murray, C. D., et Squyres, S. (2006). Cassini observes the active south pole of Enceladus. *Science*, 311(5766), 1393–1401.

Porco, C. C., Thomas, P. C., Weiss, J. W., et Richardson, D. C. (2007). Saturn's small inner satellites : Clues to their origins. *Science*, 318(5856), 1602–1607.

Porco, C. C., West, R. A., Squyres, S., McEwen, A., Thomas, P., Murray, C. D., Delgenio, A., Ingersoll, A. P., Johnson, T. V., Neukum, G., Veverka, J., Dones, L., Brahic, A., Burns, J. A., Haemmerle, V., Knowles, B., Dawson, D., Roatsch, T., Beurle, K., et Owen, W. (2004). Cassini imaging science : instrument characteristics and anticipated scientific investigations at Saturn. *Space Science Reviews*, 115(1), 363–497.

Prialnik, D. et Bar-Nun, A. (1990). Gas release in comet nuclei. *Astrophysics Journal*, 363, 274–282. doi :10.1086/169339.

Prieto-Ballesteros, O. et Kargel, J. (2006). Clathration as a process for the cryomagmatic differentiation of icy satellites. application to Enceladus and Europa. In S. Mackwell et E. Stansbery, eds., *37th Annual Lunar and Planetary Science Conference*, *Lunar and Planetary Inst. Technical Report*, volume 37, p. 1971.

Prieto-Ballesteros, O., Kargel, J., Fernández-Sampedro, M., et Hogenboom, D. (2004a). Clathrate hydrates in Jupiter's satellite Europa and their geological effects. In

P. Schenk, F. Nimmo, et L.Prockter, eds., *Workshop on* E*uropa's Icy Shell : Past, Present, and Future*, p. 7010.

Prieto-Ballesteros, O., Kargel, J., Fernández-Sampedro, M., et Hogenboom, D. (2004b). Evaluation of the possible presence of CO_2-clathrates in Europa's icy shell or seafloor. In S. Mackwell et E. Stansbery, eds., *Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts*, *Lunar and Planetary Inst. Technical Report*, volume 35, p. 1748.

Prieto-Ballesteros, O. et Kargel, J. S. (2005). Thermal state and complex geology of a heterogeneous salty crust of Jupiter's satellite, Europa. *Icarus*, 173(1), 212–221.

Prieto-Ballesteros, O., Kargel, J. S., Fernández-Sampedro, M., Selsis, F., Martínez, E. S., et Hogenboom, D. L. (2005). Evaluation of the possible presence of clathrate hydrates in Europa's icy shell or seafloor. *Icarus*, 177(2), 491–505.

Prockter, L., Pappalardo, R., Sullivan, R., Head, J., Patel, J., Giese, B., Wagner, R., Neukum, G., et Greeley, R. (1999a). Morphology and evolution of europan bands : investigation of a seafloor spreading analog. In *Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts*, *Lunar and Planetary Inst. Technical Report*, volume 30, p. 1900.

Prockter, L. M., Antman, A. M., Pappalardo, R. T., Head, J. W., et Collins, G. C. (1999b). Europa : Stratigraphy and geological history of the anti-jovian region from Galileo E14 solid-state imaging data. *J. Geophys. Res.*, 104(E7), 16531–16540.

Quirico, E. et Schmitt, B. (1997). Near-infrared spectroscopy of simple hydrocarbons and carbon oxides diluted in solid N_2 and as pure ices : implications for Triton and Pluto. *Icarus*, 127(2), 354–378. doi :DOI : 10.1006/icar.1996.5663.

Reynolds, R. T., Squyres, S. W., Colburn, D. S., et McKay, C. P. (1983). On the habitability of Europa. *Icarus*, 56(2), 246–254.

Roatsch, T., Wählisch, M., Giese, B., Hoffmeister, A., Matz, K.-D., Scholten, F., Kuhn, A., Wagner, R., Neukum, G., Helfenstein, P., et Porco, C. (2008). High-resolution Enceladus atlas derived from Cassini-ISS images. *Planetary and Space Science*, 56(1), 109–116. doi :DOI : 10.1016/j.pss.2007.03.014. Surfaces and Atmospheres of the Outer Planets, their Satellites and Ring Systems : Part III, European Geosciences Union General Assembly - Sessions PS3.02 and PS3.03.

Roos-Serote, M., Drossart, P., Encrenaz, T., Carlson, R., et Kamp, L. (1999). New NIMS 5 micron observations : Where is the water on Jupiter ? In *31st Annual Meeting of the Division for Planetary Sciences (DPS), session 51 : « Outer Planet Atmospheres Posters »*.

Roos-Serote, M., Vasavada, A. R., Kamp, L., Drossart, P., Irwin, P., Nixon, C., et Carlson, R. W. (2000). Proximate humid and dry regions in Jupiter's atmosphere indicate complex local meteorology. *Nature*, 405(6783), 158–160.

Ross, R. et Kargel, J. (1998). Thermal conductivity of solar system ices, with special reference to martian polar caps. In B. Schmitt, C. de Bergh, et M. Festou, eds., *Solar System Ices*, *Astrophysics and Space Science Library*, volume 227, p. 33.

Rothery, D. A. (1999). *Satellites of the outer planets : worlds in their own right*. Oxford Univ. Press.

Roush, T., Cruikshank, D., et Owen, T. (1995). Surface ices in the outer solar system. In K. Farley, ed., *Volatiles in the Earth and Solar System*, *American Institute of Physics Conference Series*, volume 341, p. 143.

Roush, T. L., Pollack, J. B., Witteborn, F. C., Bregman, J. D., et Simpson, J. P. (1990). Ice and minerals on Callisto : a reassessment of the reflectance spectra. *Icarus*, 86(2), 355–382.

Roy, R. (2007). *Influence des altérations de surface naturelle sur la reconnaissance des roches par télédétection* V-IR *: application á la cartographie de l'ophiolite d'*O*man et au programme d'étude des nouvelles* AOC *des* M*uscadet de la région nantaise.* Ph.D. thesis, Ecole doctorale de Mécanique, Thermique et Génie Civil.

Sagan, C., Thompson, W. R., Carlson, R., Gurnett, D., et Hord, C. (1993). A search for life on Earth from the Galileo spacecraft. *Nature*, 365(6448), 715–721.

Salisbury, J., Walter, L., Vergo, N., et D'aria, D. (1991). *Infrared (2.1-25 μm) spectra of minerals*. Johns Hopkins University Press.

Salzmann, C., Hallbrucker, A., Finney, J., et Mayer, E. (2006a). Raman spectroscopic features of hydrogen-ordering in ice XII. *Chem. Phys. Lett.*, 429, 469–473.

Salzmann, C., Kohl, I., Loerting, T., Mayer, E., et Hallbrucker, A. (2003). Pure ices IV and XII from high-density amorphous ice. *Can. J. Phys.*, 81, 25–32.

Salzmann, C., Radaelli, P., Mayer, E., et Finney, J. (2009). Ice XV : a new thermodynamically stable phase of ice. *Physical Review Letters*, 103(10), 105701. doi : 10.1103/PhysRevLett.103.105701.

Salzmann, C. G., Radaelli, P. G., Hallbrucker, A., Mayer, E., et Finney, J. L. (2006b). The preparation and structures of hydrogen ordered phases of ice. *Science*, 311(5768), 1758–1761.

Sanders, L. (2009). A very special snowball. *ScienceNew*, 176, 10.

Sandford, S., Bernstein, M., Allamandola, L., Goorvitch, D., et Teixeira, T. (2001). The abundances of solid N_2 and gaseous CO_2 in interstellar dense molecular clouds. *Astrophys. J.*, 548, 836–851. doi :10.1086/319023.

Sandford, S. A. et Allamandola, L. J. (1990). The physical and infrared spectral properties of CO_2 in astrophysical ice analogs. *The Astrophysical Journal*, 355, 357–372.

Savitzky, A. et Golay, M. J. E. (1964). Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry*, 36(8), 1627–1639. doi : 10.1021/ac60214a047.

Sawyer, K. (1990). Galileo probe reveals giant basin on moon. region likely blasted out by object 100 miles wide. *The Washington Post*.

Schmidt, J., Brilliantov, N., Spahn, F., et Kempf, S. (2008). Slow dust in Enceladus' plume from condensation and wall collisions in Tiger Stripes fractures. *Nature*, 451(7179), 685–688.

Schmitt, B., Quirico, E., Trotta, F., et Grundy, W. (1998). Optical properties of ices from UV to IR. In M. B.Schmitt, C.de Bergh, ed., *Solar System Ices*, *Astrophysics and Space Science Library*, volume 227, p. 199. Kluwer Academic Publishers.

Schmitt, B. et Rodriguez, S. (2003). Possible identification of local deposits of CL_2SO_2 on Io from NIMS/Galileo spectra. *J. Geophys. Res.*, 108(E9), 5104.

Schriver-Mazzuoli, L., Schriver, A., et Hallou, A. (2000). IR reflection-absorption spectra of thin water ice films between 10 and 160 K at low pressure. *Journal of Molecular Structure*, 554(2-3), 289–300.

Schubert, G., Anderson, J. D., Travis, B. J., et Palguta, J. (2007). Enceladus : Present internal structure and differentiation by early and long-term radiogenic heating. *Icarus*, 188(2), 345–355.

Senske, D., Greeley, R., Head, J., Pappalardo, R., Sullivan, R., Carr, M., Geissler, P., Moore, J., et Team, G. S. (1998). Geologic mapping of Europa : Unit identification and stratigraphy at global and local scales. In *Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts*, *Lunar and Planetary Inst. Technical Report*, volume 29, p. 1743.

Shkuratov, Y., Starukhina, L., Hoffmann, H., et 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. et Grynko, Y. S. (2005). Light scattering by media composed of semi-transparent particles of different shapes in ray optics approximation : consequences for spectroscopy, photometry, and polarimetry of planetary regoliths. *Icarus*, 173(1), 16–28.

Showman, A. P., Malhotra, et Renu (1999). The galilean satellites. *Science*, 286(5437), 77–84.

Showman, A. P., Stevenson, D. J., et Malhotra, R. (1997). Coupled orbital and thermal evolution of Ganymede. *Icarus*, 129(2), 367–383.

Smith, B. A., Soderblom, L., Batson, R., Bridges, P., Inge, J., Masursky, H., Shoemaker, E., Beebe, R., Boyce, J., Briggs, G., Bunker, A., Collins, S. A., Hansen, C., Johnson, T., Mitchell, J., Terrile, R., Cook, A., Cuzzi, J., Pollack, J. B., Danielson, G. E., Ingersoll, A., Davies, M. E., Hunt, G. E., Morrison, D., Owen, T., Sagan, C., Veverka,

J., Strom, R., et Suomi, V. (1982). A new look at the Saturn system : the Voyager 2 images. *Science*, 215(4532), 504–537.

Smith, B. A., Soderblom, L. A., Beebe, R., Boyce, J., Briggs, G., Carr, M., Collins, S. A., Cook, A., Danielson, G. E., Davies, M., Hunt, G., Ingersoll, A., Johnson, T. V., Masursky, H., McCauley, J., Morrison, D., Owen, T., Sagan, C., Shoemaker, E., Strom, R., Suomi, V., et Veverka, J. (1979a). The galilean satellites and Jupiter : Voyager 2 imaging science results. *Science*, 206(4421), 927–950.

Smith, B. A., Soderblom, L. A., Johnson, T. V., Ingersoll, A. P., Collins, S., Shoemaker, E., Hunt, G. E., Masursky, H., Carr, M. H., Davies, M. E., Cook, A. F., Boyce, J., Danielson, G. E., Owen, T., Sagan, C., Beebe, R., Veverka, J., Strom, R. G., McCauley, J. F., Morrison, D., Briggs, G. A., et Suomi, V. (1979b). The Jupiter system through the eyes of Voyager 1. *Science*, 204(4396), 951–972.

Smith, R., Robinson, G., Hyland, A., et Carpenter, G. (1994). Molecular ices as temperature indicators for interstellar dust : the 44 and 62 μm lattice features of H_2O ice. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 271, 481–489.

Smythe, W. (1975). Spectra of hydrate frosts : their application to the outer solar system. *Icarus*, 24, 421–427.

Smythe, W., Carlson, R., Ocampo, A., Matson, D., Johnson, T., McCord, T., Hansen, G., Soderblom, L., et Clark, R. (1998). Absorption bands in the spectrum of Europa detected by the Galileo NIMS instrument. In *Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts*, *Lunar and Planetary Inst. Technical Report*, volume 29, p. 1532.

Spahn, F., Schmidt, J., Albers, N., Horning, M., Makuch, M., Seiss, M., Kempf, S., Srama, R., Dikarev, V., Helfert, S., Moragas-Klostermeyer, G., Krivov, A. V., Sremcevic, M., Tuzzolino, A. J., Economou, T., et Grun, E. (2006). Cassini dust measurements at Enceladus and implications for the origin of the E ring. *Science*, 311(5766), 1416–1418.

Spaun, N. A. et Head, J. W. (2001). A model of Europa's crustal structure : recent Galileo results and implications for an ocean. *J. Geophys. Res.*, 106(E4), 7567–7576.

Spaun, N. A., Head, J. W., Collins, G. C., Prockter, L. M., et Pappalardo, R. T. (1998). Conamara chaos region, Europa : reconstruction of mobile polygonal ice blocks. *Geophys. Res. Lett.*, 25(23), 4277–4280.

Spencer, J., Barr, A., Esposito, L., Helfenstein, P., Ingersoll, A., Jaumann, R., McKay, C., Nimmo, F., et Waite, J. (2009). Enceladus : an active cryovolcanic satellite. In M. Dougherty, L. Esposito, et S. Krimigis, eds., *Saturn from* C*assini*-H*uygens*, p. 683. Springer Science.

Spencer, J. R. (1987). Thermal segregation of water ice on the galilean satellites. *Icarus*, 69(2), 297–313.

Spencer, J. R. et Calvin, W. M. (2002). Condensed O_2 on Europa and Callisto. *The Astronomical Journal*, 124(6), 3400.

Spencer, J. R., Calvin, W. M., et Person, M. J. (1995). Charge-coupled device spectra of the galilean satellites : Molecular oxygen on Ganymede. *J. Geophys. Res.*, 100(E9), 19049–19056.

Spencer, J. R., Pearl, J. C., Segura, M., Flasar, F. M., Mamoutkine, A., Romani, P.,

Buratti, B. J., Hendrix, A. R., Spilker, L. J., et Lopes, R. M. C. (2006). Cassini encounters Enceladus : background and the discovery of a south polar hot spot. *Science*, 311(5766), 1401–1405.

Spencer, J. R., Tamppari, L. K., Martin, T. Z., et Travis, L. D. (1999). Temperatures on Europa from Galileo PhotoPolarimeter-Radiometer : nighttime thermal anomalies. *Science*, 284(5419), 1514–1516.

Spitale, J. N. et Porco, C. C. (2007). Association of the jets of Enceladus with the warmest regions on its south-polar fractures. *Nature*, 449(7163), 695–697.

Spohn, T. et Schubert, G. (2003). Oceans in the icy galilean satellites of Jupiter ? *Icarus*, 161(2), 456–467.

Squyres, S. W., Reynolds, R. T., Cassen, P. M., et Peale, S. J. (1983a). The evolution of Enceladus. *Icarus*, 53(2), 319–331.

Squyres, S. W., Reynolds, R. T., Cassen, P. M., et Peale, S. J. (1983b). Liquid water and active resurfacing on Europa. *Nature*, 301(5897), 225–226.

Srama, R., Ahrens, T. J., Altobelli, N., Auer, S., Bradley, J. G., Burton, M., Dikarev, V. V., Economou, T., Fechtig, H., Görlich, M., Grande, M., Graps, A., Grün, E., Havnes, O., Helfert, S., Horanyi, M., Igenbergs, E., Jessberger, E. K., Johnson, T. V., Kempf, S., Krivov, A. V., Krüger, H., Mocker-Ahlreep, A., Moragas-Klostermeyer, G., Lamy, P., Landgraf, M., Linkert, D., Linkert, G., Lura, F., McDonnell, J. A. M., Möhlmann, D., Morfill, G. E., Müller, M., Roy, M., Schäfer, G., Schlotzhauer, G., Schwehm, G. H., Spahn, F., Stübig, M., Svestka, J., Tschernjawski, V., Tuzzolino, A. J., Wäsch, R., et Zook, H. A. (2004). The cassini cosmic dust analyzer. *Space Science Reviews*, 114(1), 465–518.

Stebbins, J. et Jacobsen, T. S. (1928). Further photometric measures of jupiterâĂŹs satellites and uranus, with tests for the solar constant. *Lick Observatory Bulletin*, 13, 180–195.

Stern, L. A., Kirby, S. H., et Durham, W. B. (1996). Peculiarities of methane clathrate hydrate formation and solid-state deformation, including possible superheating of water ice. *Science*, 273(5283), 1843–1848.

Stevens, T. O. et McKinley, J. P. (1995). Lithoautotrophic microbial ecosystems in deep basalt aquifers. *Science*, 270(5235), 450–455.

Stevenson, D. (2000). Europa's ocean-the case strengthens. *Science*, 289(5483), 1305–1307.

Stevenson, D. J. (1982). Volcanism and igneous processes in small icy satellites. *Nature*, 298(5870), 142–144.

Stevenson, K. P., Kimmel, G. A., Dohnálek, Z., Smith, R. S., et Kay, B. D. (1999). Controlling the morphology of amorphous solid water. *Science*, 283(5407), 1505–1507.

Strazzulla, G., Baratta, G., Leto, G., et Foti, G. (1992). Ion-beam-induced amorphization of crystalline water ice. *Europhysics Letters*, 18, 517.

Strazzulla, G., Baratta, G. A., Johnson, R. E., et Donn, B. (1991). Primordial comet mantle : irradiation production of a stable organic crust. *Icarus*, 91(1), 101–104.

Sugisaki, M., Suga, H., et Seki, S. (1969). Calorimetric study of glass transition of the amorphous ice and of the phase transformation between the cubic and hexagonal ices. In N. Riehl, ed., *Physics of ice*, p. 329. Platinium Press, New York.

Sullivan, R., Greeley, R., Klemaszewski, J., Moreau, J., Tufts, B., Head, J., Pappalardo, R., et Moore, J. (1999). High resolution geological mapping of ridged plains on Europa. In *Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts*, *Lunar and Planetary Inst. Technical Report*, volume 30, p. 1925.

Sunshine, J. M., Pieters, C. M., et Pratt, S. F. (1990). Deconvolution of mineral absorption bands : An improved approach. *J. Geophys. Res.*, 95, 6955–6966.

Tarantola, A. et Valette, B. (1982). Inverse problems = quest for information. *Journal of Geophysics*, 50, 159–170.

Teolis, B. D., Loeffler, M. J., Raut, U., Famá, M., et Baragiola, R. A. (2006). Ozone synthesis on the icy satellites. *The Astrophysical Journal Letters*, 644(2), L141.

Terrile, R. J. et Cook, A. F. (1981). Enceladus : Evolution and relation to E-ring. *Lunar and Planetary Science XII, Supplement A.*, Abstract 428, 10.

Thomas, G. E., Olivero, J. J., Jensen, E. J., Schroeder, W., et Toon, O. B. (1989). Relation between increasing methane and the presence of ice clouds at the mesopause. *Nature*, 338(6215), 490–492.

Thomas, P., Burns, J., Helfenstein, P., Squyres, S., Veverka, J., Porco, C., Turtle, E., McEwen, A., Denk, T., Giese, B., Roatsch, T., Johnson, T., et Jacobson, R. (2007a). Shapes of the saturnian icy satellites and their significance. *Icarus*, 190(2), 573–584.

Thomas, P. C., Armstrong, J. W., Asmar, S. W., Burns, J. A., Denk, T., Giese, B., Helfenstein, P., Iess, L., Johnson, T. V., McEwen, A., Nicolaisen, L., Porco, C., Rappaport, N., Richardson, J., Somenzi, L., Tortora, P., Turtle, E. P., et Veverka, J. (2007b). Hyperion/'s sponge-like appearance. *Nature*, 448(7149), 50–56.

Tobie, G., Cadek, O., et Sotin, C. (2008). Solid tidal friction above a liquid water reservoir as the origin of the south pole hotspot on Enceladus. *Icarus*, 196(2), 642–652.

Tufts, B. R., Greenberg, R., Hoppa, G., et Geissler, P. (2000). Lithospheric dilation on Europa. *Icarus*, 146(1), 75–97.

Turtle, E., Melosh, H., et Phillips, C. (1998). Tectonic modeling of the form of european ridges. *EOS TRANS. AGU Fall Meeting Suppl*, 79(45), F541.

Waite, J., J. Hunter, Combi, M. R., Ip, W.-H., Cravens, T. E., McNutt, J., Ralph L., Kasprzak, W., Yelle, R., Luhmann, J., Niemann, H., Gell, D., Magee, B., Fletcher, G., Lunine, J., et Tseng, W.-L. (2006). Cassini Ion and Neutral Mass Spectrometer : Enceladus plume composition and structure. *Science*, 311(5766), 1419–1422.

Waite, J. H., Lewis, W. S., Kasprzak, W. T., Anicich, V. G., Block, B. P., Cravens, T. E., Fletcher, G. G., Ip, W.-H., Luhmann, J. G., Mcnutt, R. L., Niemann, H. B., Parejko, J. K., Richards, J. E., Thorpe, R. L., Walter, E. M., et Yelle, R. V. (2004). The Cassini ion and neutral mass spectrometer (INMS) investigation. *Space Science Reviews*, 114(1), 113–231.

Walch, M., Juergens, D., Anthony, S., et Nicholson, P. (1992). Steller occultation experiment with the Cassini VIMS instrument. *SPIE Infrared Technology XVIII Proceedins*, 1762, 483.

Warren, S. (1986). Optical constants of carbon dioxide ice. *Applied optics*, 25, 2650–2673.

Warren, S. G. (1984). Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave. *Appl. Opt.*, 23(8), 1206–1225.

Wellman, J. B., Duval, J., Juergens, D., et Voss, J. (1987). Visible and infrared mapping spectrometer (VIMS) - a facility instrument for planetary missions. *SPIE Imaging spectroscopy II, Proceedings*, 834, 213–221.

Whalley, E. (1977). A detailed assignment of the O-H stretching bands of ice I. *Canadian Journal of Chemistry*, 55, 3429–3441.

Whittet, D., Schutte, W., Tielens, A., Boogert, A., de Graauw, T., Ehrenfreund, P., Gerakines, P., Helmich, F., Prusti, T., et van Dishoeck, E. (1996). An ISO SWS view of interstellar ices : first results ? *Astron. Astrophys.*, 315, L357–L360.

Williams, D., Klemaszewski, J., Greeley, R., Moore, J., Pappalardo, R., Prockter, L., Head, J., Geissler, P., Hoppa, G., Phillips, C., Tufts, B., Greenberg, R., Sullivan, R., Belton, M., et Team, G. I. (1999). Terrain variation on Europa : overview of Galileo orbit E17 imaging results. In *Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts*, *Lunar and Planetary Inst. Technical Report*, volume 30, p. 1396.

Williams, D. J. (1996). Jupiter-at last ! *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 17, 338–356.

Williams, K. K. et Greeley, R. (1998). Estimates of ice thickness in the conamara chaos region of Europa. *Geophys. Res. Lett.*, 25(23), 4273–4276.

Wilson, L. et Head, J. (1999). Cryomagmatism : Processes of generation, ascent and eruption and application to Europa. In *Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts*, *Lunar and Planetary Inst. Technical Report*, volume 30, p. 1689.

Wilson, P. D. et Sagan, C. (1995). Spectrophotometry and organic matter on iapetus 1. composition models. *J. Geophys. Res.*, 100(E4), 7531–7537.

Wiscombe, W. J. (1980). Improved mie scattering algorithms. *Appl. Opt.*, 19(9), 1505–1509.

Wood, B. E. et Roux, J. A. (1982). Infrared optical properties of thin H_2O, NH_3, and CO_2 cryofilms. *J. Opt. Soc. Am.*, 72, 720–728.

Wood, D. et Nassau, K. (1967). The characterization of beryl and emerald by visible and infrared spectroscopy. *Am. Mineral.*, 53, 777–800.

Yamada, H. et Person, W. (1964). Absolute infrared intensities of the fundamental absorption bonds in solid CO_2 and N_2O. *J. Chem. Phys.*, 41, 2478.

Young, D. T., Berthelier, J. J., Blanc, M., Burch, J. L., Coates, A. J., Goldstein, R., Grande, M., Hill, T. W., Johnson, R. E., Kelha, V., Mccomas, D. J., Sittler, E. C., Svenes, K. R., Szegö, K., Tanskanen, P., Ahola, K., Anderson, D., Bakshi, S., Baragiola, R. A., Barraclough, B. L., Black, R. K., Bolton, S., Booker, T., Bowman, R., Casey, P., Crary, F. J., Delapp, D., Dirks, G., Eaker, N., Funsten, H., Furman, J. D., Gosling, J. T., Hannula, H., Holmlund, C., Huomo, H., Illiano, J. M., Jensen, P., Johnson, M. A., Linder, D. R., Luntama, T., Maurice, S., Mccabe, K. P., Mursula, K., Narheim, B. T., Nordholt, J. E., Preece, A., Rudzki, J., Ruitberg, A., Smith, K., Szalai, S., Thomsen, M. F., Viherkanto, K., Vilppola, J., Vollmer, T., Wahl, T. E., Wüest, M., Ylikorpi, T., et Zinsmeyer, C. (2004). Cassini Plasma Spectrometer investigation. *Space Science Reviews*, 114(1), 1–112.

Zahnle, K., Dones, L., et Levison, H. F. (1998). Cratering rates on the galilean satellites. *Icarus*, 136(2), 202–222.

Zent, A. et Roush, T. (1992). Spectral analysis of chemisorbed CO_2 on Mars analog materials. In *Proc. Lunar Sci. Conf. XXIV*.

Etude expérimentale des signatures spectrales infrarouges des glaces d'eau et de dioxyde de carbone : applications aux satellites de glace

La signature infrarouge de la glace d'eau est dépendante de la température (T), et de la taille de grains (D), mais l'influence respective de ces deux facteurs sur les critères spectraux est difficile à évaluer. Dans ce travail, les caractéristiques spectrales de la glace d'eau ont été étudiées expérimentalement en fonction de D et T entre 80 et 140 K sous vide. Il apparaît que les paramètres des fonctions gaussiennes obtenues par ajustements des spectres expérimentaux ne sont pas représentatifs de T et D. Cependant, l'aire de la bande d'absorption à 1,5 µm est fortement corrélée à D et les aires réduites des bandes définies sur les domaines 1,24–1,34 µm et 1,49–1,69 µm permettent de contraindre l'influence de T et D sur les spectres.
L'influence du dioxyde de carbone sur le spectre de la glace d'eau a été analysée avec des clathrates d'hydrates et des mélanges mécaniques de glaces d'eau et de CO_2. Les absorptions du CO_2 dans le mélange sont identiques à celles de la glace de CO_2 pure mais différent dans les clathrates. Le spectre des clathrates de CO_2 présente deux bandes d'absorption caractéristiques à 2,7 et 4,25 µm qui ne dépendent pas de T et D.
Ce travail expérimental, appliqué aux données VIMS, permet de mieux contraindre les températures et tailles de grains du pôle Sud d'Encélade. De plus, les satellites joviens et saturniens ont été explorés pour déterminer l'état du CO_2 présent à leur surface et ses interactions avec la glace d'eau. La bande d'absorption à 2,7 µm a été observée sur certaines régions, indiquant la présence éventuelle de clathrates de CO_2 sur les lunes de glace.

Mots-clefs : Etude expérimentale, Spectroscopie infrarouge, Glace d'eau, Dioxyde de carbone, Clathrates de CO_2, Satellites de glace, NIMS, VIMS

Experimental study of infrared spectral signatures of water and carbon dioxide ices : Applications to icy satellites.

Infrared signatures of water ice depend strongly on both temperature (T) and grain size (D). But the mutual dependence of spectral characteristics is poorly understood. Experimental studies have been conducted to better constrain IR reflectance of ices with respect to T and D. Water ice near-IR spectra have been acquired with controlled grain sizes, and temperatures ranging from 80 to 140 K in vacuum. Spectral characteristics based on Gaussian fits of experimental spectra cannot be used as T or D sensors. But a good indicator of the grain size is the 1.5 µm absorption band area, which is almost independent on T. And, the two band areas at 1.240 - 1.344 µm and 1.486 - 1.691 µm, allow to retrieve the temperature from the near IR spectra.
Experimental studies have been conducted to study the carbon dioxide influence on water ice IR spectra with both H_2O – CO_2 ices and H_2O ice – clathrate hydrate mixtures. CO_2 absorptions in the H_2O – CO_2 icy samples are similar to those of the pure CO_2 ice. But, absorption are different when the CO_2 is trapped into the clathrate structure. The 2.7 and 4.25 µm bands are characteristic of the CO_2-clathrate hydrates. Studies on its spectral features have been conducted, but no T- or D- dependences have been detected.
The scaling laws have been applied on VIMS spectra to retrieve the temperature and grain size distribution around the Tiger Stripes area, on Enceladus' south pole. Studies are conducted on other Galilean and Saturnian satellites to understand the nature of the CO_2 which is observed on many surfaces. The 2.7-µm absorption band has been detected on few areas. Thus, the existence of CO_2-clathrate hydrates on icy moons may be possible.

Key-words : Experimental study, Infrared spectroscopy, Water ice, Carbone dioxide, CO_2 clathrates hydrates, Icy satellites, NIMS, VIMS