

Université de Montréal

**Variation des biomarqueurs dans le spectre visible non
résolu de la Terre**

Par

Marie-Eve Naud

Département de physique
Faculté des arts et des sciences

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures
en vue de l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.)
en physique

Décembre 2010

© Marie-Eve Naud, 2010

Université de Montréal
Faculté des études supérieures et postdoctorales

Ce mémoire intitulé :

Variation des biomarqueurs dans le spectre visible non résolu de la Terre

Présenté par :
Marie-Eve Naud

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Claude Carignan, président-rapporteur
François Wesemael, directeur de recherche
Robert Lamontagne, codirecteur
Pierre Bergeron, membre du jury

Résumé

L'évolution rapide des technologies de détection et de caractérisation des exoplanètes depuis le début des années 1990 permet de croire que de nouveaux instruments du type *Terrestrial Planet Finder* (TPF) pourront prendre les premiers spectres d'exoplanètes semblables à la Terre d'ici une ou deux décennies. Dans ce contexte, l'étude du spectre de la seule planète habitée connue, la Terre, est essentielle pour concevoir ces instruments et analyser leurs résultats. Cette recherche présente les spectres de la Terre dans le visible (390-900 nm), acquis lors de 8 nuits d'observation étalées sur plus d'un an. Ces spectres ont été obtenus en observant la lumière cendrée de la Lune avec le télescope de 1.6 m de l'Observatoire du Mont-Mégantic (OMM). La surface de la Lune réfléchissant de manière diffuse la lumière provenant d'une portion de la Terre, ces spectres sont non résolus spatialement. L'évolution de ces spectres en fonction de la lumière réfléchi à différentes phases de Terre est analogue à celle du spectre d'une exoplanète, dont la phase change selon sa position autour de l'étoile.

L'eau, l'oxygène et l'ozone de l'atmosphère, détectés dans tous nos spectres, sont des biomarqueurs dont la présence suggère l'habitabilité de la planète et/ou la présence d'une activité biologique. Le *Vegetation Red Edge* (VRE), une autre biosignature spectrale, dû aux organismes photosynthétiques à la surface, est caractérisé par l'augmentation de la réflectivité autour de 700 nm. Pour les spectres de 5 nuits, cette augmentation a été évaluée entre $-5 \pm 5\%$ et $15 \pm 5\%$, après que les contributions de la diffusion de Rayleigh, des aérosols et d'une large bande moléculaire de l'ozone aient été enlevées. Les valeurs mesurées sont cohérentes avec la présence de végétation dans la phase de la Terre contribuant au spectre, mais s'étendent sur une plage de variations plus large que celles trouvées dans la littérature (0-10%). Cela pourrait s'expliquer par des choix faits lors de la réduction des données et du calcul du VRE, ou encore par la présence d'autres éléments de surface ou de l'atmosphère dont la contribution spectrale autour de 700 nm serait variable.

Mots-clés : Spectre de la Terre, Lumière cendrée, Biomarqueurs, *Vegetation Red Edge*, Exoplanètes terrestres

Abstract

The rapid evolution of the detection and characterization of exoplanets since the nineties is such that instruments like the Terrestrial Planet Finder (TPF) will surely take the first spectra of exoplanets similar to the Earth in the next decades. The study of the spectrum of the only inhabited planet we know, the Earth, is thus essential to conceive these instruments and to complete pertinent analyses of their results. This research presents the optical spectra (390-900 nm) of the Earth that were secured on 8 observing nights covering more than a year. These spectra were obtained by observing the Earthshine with the 1.6 m telescope at the Observatoire du Mont-Mégantic (OMM). Because the surface of the Moon reflects diffusely the light coming from a portion of the Earth, the observation of Earthshine allow us to get spatially unresolved spectra, like those that will likely be obtained for exoplanets with the first generation of instruments. The variation of the Earth's spectrum with the changing contributing phase of the Earth is also similar to that of an exoplanet spectrum, which changes with its position around the star.

Water, oxygen and ozone of the Earth's atmosphere, detected in all of our spectra, are biomarkers. They give clues about the habitability and the possible presence of life on a planet. The Vegetation Red Edge (VRE), another spectral biomarker, caused by photosynthetic organisms, is characterized by an increase in reflectivity around 700 nm. For the spectra of 5 nights, this increase was evaluated to be between $-5 \pm 5\%$ and $15 \pm 5\%$, after the contributions of Rayleigh and aerosol scattering, as well as of a wide ozone absorption band were removed. These values are consistent with the presence of vegetation in the phase of the Earth contributing to the spectra. However, they cover a larger range than that usually found in the literature (0-10%). A possible explanation could be the few arbitrary choices that were made during data processing and VRE computation or the presence of other surface and atmospheric elements with a spectral signature varying around 700 nm.

Keywords: Earth spectrum, Earthshine, Biomarkers, Vegetation Red Edge, Terrestrial Exoplanets

Table des matières

Résumé.....	iii
Abstract.....	iv
Table des matières.....	v
Liste des tableaux.....	vii
Liste des figures.....	viii
Liste des sigles et abréviations.....	ix
Remerciements.....	xi
Chapitre 1 Introduction.....	1
1.1 La vie ailleurs que sur Terre.....	1
1.1.1 L'astrobiologie: une science nouvelle, des idées anciennes.....	1
1.1.2 Les exoplanètes: quinze ans de détection de nouveaux mondes.....	2
1.1.3 Le Saint Graal de l'astrobiologie: une exoplanète habitable.....	3
1.1.3.1 Une planète habitable.....	3
1.1.3.2 L'état actuel des choses.....	6
1.1.4 Prochaine étape : la détection de signes de vie.....	6
1.2 La Terre: spécimen de planète habitée.....	8
1.2.1 La Terre, un objet astronomique.....	8
1.2.2 De la vie sur Terre?.....	9
1.2.3 La lumière cendrée de la Lune pour étudier la Terre.....	10
1.2.4 Biomarqueurs spectroscopiques du spectre de la Terre.....	12
1.2.4.1 Biomarqueurs atmosphériques.....	12
1.2.4.2 Un biomarqueur de surface : le <i>Vegetation Red Edge</i>	16
1.3 Variabilité des biomarqueurs dans le spectre de réflexion de la Terre : présentation de l'article et de l'annexe.....	19
Chapitre 2 Biomarkers variation in the unresolved optical spectrum of the Earth.....	22
Abstract.....	23
2.1. Introduction.....	24
2.2. Observations and data processing.....	27

2.2.1 Observations.....	27
2.2.2 Data reduction	28
Fringe elimination	28
Sky subtraction.....	28
Extraction of the final spectra	29
2.3. Results.....	30
2.3.1 Atmospheric biomarker signatures in the optical reflection spectrum.....	30
2.3.2 Surface biomarker signature: the Vegetation Red Edge.....	32
2.3.3 Variations of the atmospheric biomarkers	35
Molecular species.....	36
The Vegetation Red Edge	37
2.4. Discussion	39
2.5. Conclusion	40
2.6 References.....	42
Table and figure captions	46
Tables and figures	48
Conclusion	57
Bibliographie.....	59
Annexe A: Détails techniques propres au projet.....	i
1 Observations.....	i
2 Réduction des données.....	v
2.1 Données brutes.....	v
2.2 Logiciels de réduction.....	vi
2.3 Étapes de réduction	vi

Liste des tableaux

1.1 Biomarqueurs spectraux atmosphériques dans le visible et le proche infrarouge	13
2.1 Summary of observations	48
Continued	49
2.2 Summary of VRE measurements for the spectra illustrated on Figure 2.6	50

Liste des figures

1.1 Spectre de réflexion et d'émission des planètes du système solaire et du Soleil et plages de longueur d'onde des TPF.	8
1.2 Géométrie du système Terre-Lune-Soleil, phénomène de la lumière cendrée. Encadré: Lumière cendrée et croissant de Lune.	11
1.3 Le <i>Vegetation Red Edge</i> dans le spectre de réflexion de plusieurs organismes photosynthétiques.	17
1.4 Signature spectrale de quelques types de surfaces et de nuages de différentes altitudes	18
2.1 The average of the spectra taken on 19 May 2009, between 7:48UT and 8:17UT.	51
2.2 Average of spectra taken between 23:40UT on 28 February 2009 and 01:30UT on 1 March 2009.	52
2.3 Average spectrum of 19 May 2009, median averaged to a spectral resolution of typical of the first generation space-based spectrograph like TPF-C.	53
2.4 Average spectra for 28 February/1 March 2009 (blue) and for 19 May 2009 (green), corrected for Rayleigh and aerosol scattering and ozone Chappuis band absorption.	54
2.5 Median spectra obtained on each of the 8 nights of observation.	55
2.6 The spectra of 5 nights corrected for ozone absorption and Rayleigh/aerosol scattering.	56
A.1 Calendrier des séances d'observation	iv
A.2 Données brutes d'une pose de Lune cendrée et d'une du croissant de Lune	v
A.3 Illustration de la méthode employée pour corriger les spectres MS pour la variation spectrale avec l'angle de phase	xv
A.4 Ligne du temps pour la séance d'observation du 19 mai 2009	xvi

Liste des sigles et abréviations

CCD	<i>Charged-Couple Device</i> , dispositif à transfert de charges
CRSNG	Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada
ER	<i>Earth spectrum</i> , spectre de la Terre
ES	<i>Earthshine spectrum</i> , spectre de la lumière cendrée de la Lune
ESA	<i>European Space Agency</i>
GHZ	<i>Galactic Habitable Zone</i> , zone habitable galactique
HZ	<i>Habitable Zone</i> , zone habitable
IDL	<i>Interactive Data Language</i>
IRAF	<i>Image Reduction and Analysis Facility</i>
M_{\oplus}	Masse de la Terre
MS	<i>Moonshine spectrum</i> , spectre du croissant de Lune éclairé directement par le Soleil
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
OMM	Observatoire du Mont-Mégantic
PP	<i>Bias</i> , Plages de mesure du piédestal
PU	<i>Flat</i> , Plages uniformes
SETI	<i>Search for Extra-Terrestrial Intelligence</i>
S/N	<i>Signal-to-noise ratio</i> , rapport signal sur bruit
TPF-C	<i>Terrestrial Planet Finder</i> , coronagraph
TPF-O	<i>Terrestrial Planet Finder</i> , occulter
TPF-I	<i>Terrestrial Planet Finder</i> , interferometer
UT	<i>Universal Time</i> , temps universel
VRE	<i>Vegetation Red Edge</i> , montée brusque de la réflectivité de la végétation dans le rouge

*À Pierre-Marc,
mon Soleil à moi*

Remerciements

Mes premiers remerciements vont à mes deux superviseurs, vous qui avez été des guides exceptionnels. Votre respect et votre confiance en moi m'ont permis de me relever en douceur pour mieux recommencer. Un grand merci aussi à mon père et à Pierre Moreau, et à tous ceux qui ont joué ce rôle de mentor à des moments cruciaux.

Il aurait été impossible pour moi de compléter cette maîtrise sans le support du CRSNG. Dans la société où nous vivons, étudier une discipline qui tient de la connaissance à l'état pur, et qui est motivée par un questionnement enraciné profondément dans notre nature humaine est un formidable honneur.

L'amitié que j'ai développée avec mes collègues de bureau Marie-Michèle, Cassandra, Sandie, Marilyn, Noemi, Myriam et ceux du département a été une grande source de motivation, et a rendu le quotidien plus léger et plus agréable. Merci d'avoir été là pour mettre en perspective les « catastrophes » et multiplier le bonheur des réussites. Un grand merci à mes ami(e)s de longue date, qui ont toujours témoigné de l'intérêt face à mon sujet de recherche, souvent très éloigné de leurs propres disciplines. Laurence, Sam, Sophie, Geneviève, Andrée-Anne, Audrey, Simon, Rob, Rachel et les autres, merci.

Les plus grands remerciements reviennent finalement à ma famille: Paul et Hélène, les meilleurs parents qu'on puisse imaginer, Marie-Catherine, ma sœur et ma *teammate* dans la vie depuis le début, Pierre-Marc, mon amoureux et mon autre *teammate* exceptionnel, mes grands-parents Jules et Jacqueline ainsi que mon frère Steeve, de véritables sources d'inspiration, et tous les autres. Sans vous, je ne serais pas ici aujourd'hui à faire ce que j'aime.

*"Somewhere, something incredible
is waiting to be known"*
*« Quelque part, quelque chose d'incroyable
attend d'être connu. »*

Attribué à Carl Sagan, astronome américain, 1934-1996

Chapitre 1

Introduction

1.1 La vie ailleurs que sur Terre

1.1.1 L'astrobiologie: une science nouvelle, des idées anciennes

La possibilité de vie ailleurs que sur Terre est une idée qui a été évoquée dès l'Antiquité. Le philosophe grec Épicure (342-270 av. J.-C.), évoquait déjà, dans sa *Lettre à Hérodoté*, l'existence d'une infinité de mondes sur lesquels les germes de la vie pourraient s'être répandus. Au 17^{ème} siècle, la révolution copernicienne écarte la vision géocentrique qui prévalait depuis plusieurs siècles, et permet à plusieurs écrivains, philosophes et scientifiques comme Giordano Bruno (1548-1600), Johannes Kepler (1571-1630), John Wilkins (1614-1672), Bernard le Bovier de Fontenelle (1657-1757) et Christiaan Huygens (1629-1695) d'imaginer une multitude de systèmes solaires - souvent habités - au-delà du nôtre (Crowe 1997).

À la fin du 19^{ème} siècle, de nouvelles réalités scientifiques amènent des arguments en faveur de l'hypothèse de la vie ailleurs dans l'Univers. Par exemple, l'avènement de la spectroscopie en astronomie montrant que les éléments chimiques et les lois de la physique qui les régissent sont les mêmes dans le reste de l'Univers; plusieurs croient qu'il serait logique qu'il en soit de même pour la vie (Hollis 1908; Raulin-Cerceau 2005). L'engouement s'intensifie vers le milieu du 20^{ème} siècle, alors que les théories de formation des planètes en vogue permettent l'existence de quantité de systèmes planétaires au-delà du nôtre. C'est à cette époque que sont faites – et démenties - les premières annonces de détection d'exoplanètes ou de compagnons de faible masse (Strand 1943; van de Kamp 1963) et que le programme SETI, dédié à la détection de la vie intelligente, débute en exploitant l'astronomie radio (Cocconi and Morrison 1959). Ce sont les balbutiements

d'une toute nouvelle science, nommée l'astrobiologie ou l'exobiologie ou la bioastronomie, et qui exploite la chimie, la physique, la biologie, la géologie et bien d'autres sciences et techniques pour mieux comprendre l'origine, la distribution et l'évolution de la vie dans l'Univers.

À bien des égards cependant, c'est la fin du 20^{ème} siècle qui a amené les connaissances scientifiques qui ont permis de faire de la vie dans l'Univers un véritable sujet d'étude scientifique. Le véritable coup d'envoi à l'astrobiologie a été donné par des découvertes marquantes comme celle de vie microscopique, les extrémophiles, dans des milieux qu'on croyait auparavant hostiles (Brock and Darland 1970) ou encore la première détection non équivoque d'une exoplanète autour d'une étoile semblable au Soleil (Mayor and Queloz 1995). Cette découverte a non seulement permis un essor du domaine de l'astrobiologie, mais a aussi donné naissance à un tout nouveau pan de l'astronomie observationnelle, celui de la détection et de l'étude des planètes hors du système solaire.

1.1.2 Les exoplanètes: quinze ans de détection de nouveaux mondes

La plupart des méthodes de détection d'exoplanètes sont connues depuis le milieu du 20^{ème} siècle (Bracewell 1978; Struve 1952; van de Kamp 1956), mais ce n'est que plusieurs dizaines d'années plus tard, dans les années 90, que les premières exoplanètes ont été détectées avec succès. Ce délai est en partie imputable aux considérables difficultés techniques engendrées par la proximité des exoplanètes de leur étoile et par la faible luminosité de ces corps froids par rapport à leur hôte. En 1992 pourtant, l'exploit est accompli : des planètes de 3-4 fois la masse de la Terre (M_{\oplus}) sont détectées grâce au délai qu'elles imposent aux impulsions radio, autrement très stable, qui sont captées de leur hôte, le pulsar PSR B1257+12 (Wolszczan and Frail 1992). Ensuite, 3 ans ont été nécessaires pour qu'une première planète, une géante gazeuse, soit repérée autour d'une étoile de la séquence principale, grâce à la légère oscillation périodique qu'elle impose à cette dernière (méthode de la vélocimétrie par effet Doppler) (Mayor and Queloz 1995).

Le domaine des exoplanètes a subséquentment connu un enchaînement rapide de « premières ». En 1999, une première planète est détectée par la méthode de transit, c'est-à-

dire en détectant la diminution de brillance de l'étoile causée par le passage de la planète devant elle (Henry *et al.* 2000). La même année, une deuxième et une troisième planètes sont découvertes autour de l'étoile υ And, qui devient ainsi la première étoile de la séquence principale à posséder un système exoplanétaire (Butler *et al.* 1999). À partir de 2002, l'étude spectroscopique de quelques planètes devient possible : le spectre d'une planète et son étoile est enregistré quand la planète n'est pas occultée, puis on soustrait le spectre de l'étoile seule pendant le transit. Différents constituants de l'atmosphère de géantes gazeuses proches de leur étoile comme le sodium, l'hydrogène, l'eau, le méthane, le dioxyde et le monoxyde de carbone sont alors identifiés (Charbonneau *et al.* 2002; Tinetti *et al.* 2007). Les méthodes de transit et de vélocimétrie par effet Doppler, les plus utilisées, permettent de détecter indirectement les exoplanètes, grâce à l'influence qu'elles ont sur la lumière de leur étoile. Ce n'est qu'en 2008 que les premières détections directes sont faites (Kalas *et al.* 2008; Marois *et al.* 2008; Lafrenière *et al.* 2008). Les exoplanètes détectées autour de HR 8799 et de Fomalhaut grâce à la lumière qu'elles émettent sont très massives et très éloignées de leur étoile. Aujourd'hui, 15 ans après la première détection, on compte 510 planètes confirmées qui orbitent autour de 428 étoiles¹ situées pour la plupart dans le voisinage solaire, en deçà de quelques centaines de parsecs.

1.1.3 Le Saint Graal de l'astrobiologie: une exoplanète habitable

1.1.3.1 Une planète habitable

Bien que ce ne soit pas l'unique but de l'étude des exoplanètes, une forte volonté anime la communauté de détecter une planète semblable à la Terre, qui aurait le potentiel d'abriter la vie. Cependant, les biais des deux principales méthodes de détection d'exoplanètes à partir du sol (vélocimétrie par effet Doppler et transit) favorisent la détection de planètes massives se trouvant dans une orbite très rapprochée de l'étoile, et donc très chaudes.

Ces exoplanètes sont à première vue de très mauvaises candidates pour abriter la vie, à tout le moins une forme de vie semblable à celle que l'on trouve sur Terre. Une planète

¹ *L'Encyclopédie des planètes extrasolaires* © 2010, <http://www.obspm.fr/planets>, maintenue par Jean Schneider CNRS-LUTH, Observatoire de Paris. Consulté le 17 décembre 2010.

habitable pour une vie qui partage un minimum de caractéristiques avec la vie terrestre, entre autres basée sur le carbone et l'eau², a forcément des points communs avec la Terre. En particulier, il semble indispensable qu'une planète habitable fournisse pour une période assez longue une surface solide, de l'eau liquide en surface, ainsi qu'une atmosphère. Ces différentes conditions imposent à leur tour des limites sur la masse et la densité de la planète, sur la masse de son étoile ainsi que sur la distance entre les deux.

Une planète rocheuse ou tellurique, composée d'un mélange de fer, de silicates, de carbone et de glace, offre, à l'interface entre la surface solide et l'atmosphère, un milieu privilégié pour la vie. C'est là que se trouvent en abondance matériaux bruts et énergie et c'est là également où les composés chimiques peuvent se concentrer et réagir entre eux (Hitchcock and Lovelock 1967). Les modèles actuels laissent croire que de telles planètes existent à des masses inférieures à environ 10 M_{\oplus} . Au-delà, lors de la formation, l'atmosphère s'effondre sur le noyau, le processus d'accrétion s'emballe, et la planète accumule du gaz en grande quantité jusqu'à devenir géante (Lissauer and Stevenson 2007). La masse d'une planète habitable doit cependant être assez grande pour retenir l'atmosphère qui fournit matière première et protection.

Pour conserver de l'eau liquide en surface, une planète rocheuse doit orbiter autour de son étoile à une distance ni trop faible, ni trop grande pour que le rayonnement qu'elle reçoit, couplé à l'effet de serre créé par son atmosphère, lui permette de maintenir une température entre 0 et 100°C. Cette zone annulaire autour de l'étoile est appelée « zone habitable » (HZ) (Kasting *et al.* 1993). Les limites de cette zone sont aussi déterminées par la nécessité

² Certaines études très complètes ont été faites sur de possibles formes de vie très éloignées de la vie terrestre (Baross 2007; Schulze-Makuch and Irwin 2004). Cependant, étant donné la difficulté de détecter des formes de vie dont on ignorerait tout a priori, la majeure partie de la recherche en astrobiologie considère des formes de vie qui partageraient un minimum de caractéristiques avec la vie terrestre, en particulier la chimie du carbone comme base.

Bien qu'il soit impossible d'affirmer qu'elle soit réellement universelle, la biochimie à la base de la vie terrestre présente des avantages. Le carbone peut former plusieurs liens, ce qui lui permet de constituer les grosses molécules nécessaires à contenir l'information du vivant. Un solvant semble essentiel pour permettre les réactions chimiques du vivant. L'eau, comme solvant, a l'avantage de demeurer liquide dans une grande plage de pressions et de températures et de posséder une nature dipolaire qui facilite la fabrication des structures moléculaires et biologiques. C'est, de plus, une molécule très répandue dans l'Univers.

qu'elle soit assez éloignée pour ne pas que les molécules de l'atmosphère primordiale se dissocient et s'échappent dans l'espace.

La nature de l'étoile influence aussi l'habitabilité d'une planète. Les étoiles très massives ou actives ne sont pas de bonnes candidates étant donné que leur rayonnement est nocif pour l'atmosphère et pour les molécules fragiles qui constituent le vivant. De plus, les étoiles massives restent très peu de temps sur la séquence principale, ce qui limite la période de temps pendant laquelle l'étoile est stable et la vie peut se développer. La position de l'étoile hôte dans la Galaxie pourrait aussi jouer un rôle. La « zone galactique habitable » (GHZ), concept analogue à la zone habitable définie plus tôt, englobe les régions de la Galaxie où l'étoile est à une distance idéale des zones de formation stellaire. Cette zone élimine, en premier lieu, les endroits où le nuage protostellaire ne posséderait pas assez d'éléments lourds nécessaires à la formation d'une planète rocheuse et de molécules complexes à la base de la vie; en second lieu, elle élimine les endroits où le rayonnement émis par les étoiles environnantes, à différents stades de leur évolution, pourrait être nuisible au développement de ces mêmes molécules (Gonzalez *et al.* 2001; Lineweaver *et al.* 2004; Prantzos 2008).

Une variété de caractéristiques propres à la Terre comme l'activité tectonique, le champ magnétique, la présence d'une géante gazeuse au sein du même système planétaire ou la présence d'un satellite naturel massif pourraient aussi avoir un rôle plus ou moins essentiel à jouer dans l'habitabilité et le développement de la vie sur une planète (Ward and Brownlee 2000).

Des environnements très différents de ceux trouvés sur Terre, comme ceux associés à des planètes autour d'étoiles binaires ou à des satellites massifs d'exoplanètes géantes gazeuses, ne sont pas à exclure a priori des lieux potentiellement habitables/habités (Duchêne 2010; Haghighipour *et al.* 2010; Kaltenegger 2010; Kipping *et al.* 2009; Lammer *et al.* 2009). Cependant, la détection et la caractérisation de tels milieux, très différents de ceux que l'on trouve sur Terre, présentent des difficultés techniques qui n'en font pas des cibles de premier choix.

1.1.3.2 L'état actuel des choses

Moins d'une vingtaine des planètes connues ont une masse inférieure à $10 M_{\oplus}$. À ce jour, le système planétaire de la naine rouge Gliese 581 est le seul qui pourrait contenir des planètes qui seraient à la fois peu massives et à une distance propice de leur étoile. Deux des planètes de ce système sont aux limites intérieure et extérieure de la ZH, mais l'une serait trop proche de l'étoile et l'autre trop loin (Selsis *et al.* 2007; von Bloh *et al.* 2007). L'existence même d'une autre planète, qui serait en plein milieu de la ZH de ce système (Vogt *et al.* 2010), est toujours controversée (Kerr 2007). Pour l'instant, la détection de planètes rocheuses par vélocimétrie par effet Doppler est limitée autour d'étoiles de faibles masses comme Gliese 581. Les spectrographes actuels au sol ont une précision trop faible pour détecter des systèmes analogues au système Soleil-Terre. Pour cela, il faudra attendre les futurs spectrographes de grande précision au sol, comme les instruments associés aux télescopes géants (Pepe and Lovis 2008).

Même si la liste des exoplanètes telluriques est encore courte, la distribution des planètes trouvées jusqu'à maintenant, qui montre une augmentation du nombre de planètes pour les masses les plus faibles, laisse croire qu'elle devrait s'allonger à mesure que les techniques de détection deviennent de plus en plus sensibles. Cela pourrait être le cas dès février 2011, alors que les résultats du télescope spatial Kepler, qui peut détecter des planètes de faible masse par transit, seront dévoilés. Pendant que ces instruments au sol et télescopes spatiaux s'attèlent à la détection de planètes rocheuses situées dans la zone habitable et à leur caractérisation physique, la conception d'instruments ayant pour objectif l'étude de la composition de leur atmosphère, l'analyse de leur habitabilité et la détection de signes de vie sur ces planètes terrestres est en cours.

1.1.4 Prochaine étape : la détection de signes de vie

La caractérisation des exoplanètes terrestres implique la détection, à distance, de signes d'habitabilité et d'indices de présence de vie. À cette fin, un ou plusieurs instruments comme les Terrestrial Planet Finder (TPF) de la NASA et de l'ESA, soit le coronographe (TPF-C), l'occulteur (TPF-O), ou l'interféromètre (TPF-I/Darwin), pourraient voir le jour à l'horizon 2020-2030. Ces nouveaux instruments, de manière analogue à la détection directe

des planètes de HR 8799 (Marois *et al.* 2008), devront isoler la lumière émise ou réfléchiée par des planètes terrestres de celle de leur étoile. Ces observations ne fourniront vraisemblablement aucune information spatiale, toute la lumière reçue sera intégrée en un point. De plus, la résolution temporelle sera limitée par la durée nécessaire à l'accumulation d'une quantité suffisante de lumière.

Analysée par un ensemble de méthodes, cette lumière pourra toutefois révéler beaucoup d'information sur la planète, son habitabilité et la possible présence de vie. La photométrie permet de produire des courbes de lumière, qui à leur tour donnent de l'information sur la météo, l'existence de saisons, la période de rotation, la présence de nuages, la présence de continents/océans, etc. (Ford *et al.* 2001). La lumière émise par une étoile, non polarisée à sa source, peut être polarisée par la présence d'une atmosphère (Wolstencroft *et al.* 2005), tandis que les organismes vivants eux-mêmes polarisent circulairement la lumière visible (Sterzik *et al.* 2009; Wolstencroft and Raven 2002). La spectroscopie reste cependant une méthode privilégiée pour caractériser les exoplanètes. Les TPF feront tous de la spectroscopie à faible résolution ($R=10-100$). Le TPF-C et le TPF-O étudieront le spectre de réflexion en visible/proche infrarouge, tandis que l'interféromètre TPF-I étudiera le spectre d'émission en infrarouge thermique (Figure 1.1).

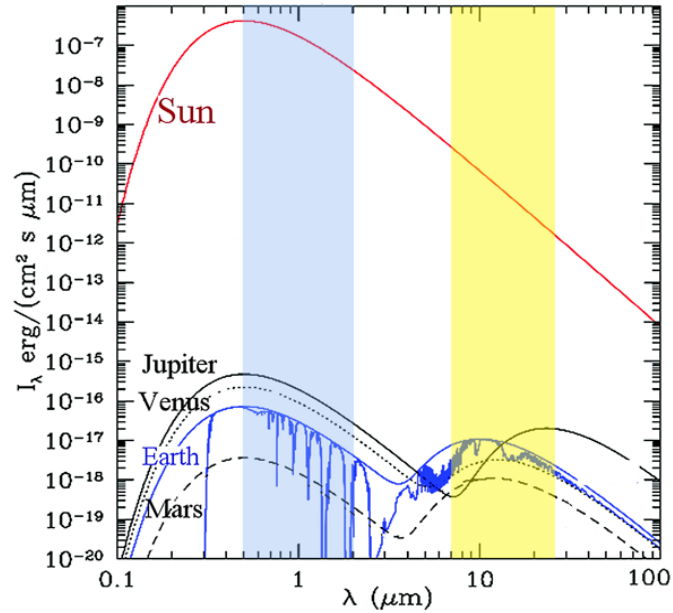


FIG. 1. 1 - Spectre de réflexion et d'émission des planètes du système solaire et du Soleil et plages de longueur d'onde des TPF. En bleu, le visible des TPF-C et TPF-O, en jaune, l'infrarouge thermique du TPF-I. Figure adaptée de Kaltenegger *et al.* (2010).

Pour faciliter l'interprétation des résultats qui seront obtenus par ces instruments sur des planètes lointaines potentiellement habitables et/ou habitées, l'étude de la seule planète connue qui abrite la vie, la Terre, est essentielle, puisqu'elle permet d'obtenir des premières données, d'identifier les caractéristiques nécessaires aux futurs instruments, de tester les modèles théoriques, etc.

1.2 La Terre: spécimen de planète habitée

1.2.1 La Terre, un objet astronomique

Pour établir des parallèles convaincants entre notre planète et celles potentiellement habitées qui seront étudiées grâce à des instruments du type TPF, il faut considérer celle-ci dans sa globalité, c'est-à-dire la voir comme un objet astronomique, ce qui présente un défi technologique de taille. Les premières images de la surface de la Terre vue des airs, rendues possibles grâce au développement de la photographie et des ballons, remontent seulement au milieu du 20^{ème} siècle. C'est dans les années 1960 que le développement de l'aéronautique a permis d'obtenir les premières photos en couleur montrant la Terre dans sa

totalité. Suivant le développement des satellites, les premières sondes spatiales ont été envoyées vers la Lune, les planètes et autres objets du système solaire dès le milieu des années 1960. Certains clichés de la planète pris par ces sondes sont devenus légendaires, comme celui baptisé *Blue Marble*, obtenu par les astronautes d'*Apollo 17* en route vers la Lune en 1972, ou encore celui baptisé *Pale Blue Dot*, pris en 1990 par la sonde *Voyager 1*, alors située au-delà de l'orbite de Neptune (Sagan 1994).

1.2.2 De la vie sur Terre?

Dès le lancement des premiers satellites scientifiques destinés à l'observation de la planète et de son atmosphère, les premières tentatives de détection à distance de la vie terrestre sont faites sur des images du sol prises à une résolution spatiale allant de 0.2 à 2 km (Kilston *et al.* 1966; Sagan and Wallace 1971). Ces études rapportent qu'un faible pourcentage des images satellites montrent des structures macroscopiques indicatives de vie intelligente sur Terre, comme par exemple le quadrillé d'une zone de coupe forestière du Canada. La sonde *Galileo*, qui en 1990 survolait la Terre afin de se rendre vers Jupiter, a obtenu les premières données spectroscopiques de la Terre, qui ont aussi été l'objet d'une étude astrobiologique. La sonde détecte non seulement des signaux radio associés à la présence d'une forme de vie intelligente, mais les spectres enregistrés montrent la présence en grande quantité d'oxygène et de méthane, deux gaz très réactifs, qui disparaissent rapidement s'ils ne sont pas renouvelés, ce qui, sur Terre, est l'œuvre d'espèces vivantes (Sagan *et al.* 1993).

Bien qu'un nombre croissant de satellites scientifiques se trouvent en orbite autour de la Terre, cette technique n'est pas privilégiée pour étudier la Terre comme une planète éloignée. Ces satellites sont en effet à trop faible altitude pour prendre des images globales de la planète. Leurs observations, souvent restreintes à une étroite plage de longueurs d'onde, se concentrent sur des zones géographiques limitées, et sont donc très différentes de celles en lumière intégrée du disque de la Terre qui pourraient être obtenues d'un autre système solaire. Il est difficile, voire impossible, d'obtenir une observation non résolue représentative à partir de ces gros plans, puisque cela implique de calibrer et de combiner des images qui, selon leur provenance, auraient été réfléchies dans différentes directions et à travers différentes épaisseurs d'atmosphère (Seager *et al.* 2005). Les sondes spatiales interplanétaires atteignent des altitudes beaucoup plus élevées que les satellites, puisqu'elles

se détachent du champ d'attraction de la planète. Depuis les débuts de l'ère spatiale, plusieurs missions dédiées à l'un ou l'autre des corps du système solaire ont observé notre planète, et ce avec divers instruments: *Mars Global Surveyor* (1996), *Mars Express* (2002), *Rosetta* (2005), *Deep Impact EPOCh* (2005). Mis à part la sonde *Venus Express* (2007), qui a observé régulièrement la Terre pendant plusieurs mois (Grinspoon *et al.* 2008), les observations par sondes sont habituellement ponctuelles, et leur coût les rend peu adaptées à l'observation continue de notre planète.

Heureusement, une autre solution, très pratique et peu coûteuse, permet d'obtenir de l'information non résolue de la planète sans même quitter celle-ci, en exploitant la lumière cendrée de notre satellite naturel.

1.2.3 La lumière cendrée de la Lune pour étudier la Terre

La lumière cendrée de la Lune est la faible lueur qui provient de la portion plus sombre du disque de la Lune (Figure 1.2, encadré). Cette lumière, beaucoup plus faible que celle qui parvient de la portion brillante, est émise par le Soleil, et elle parvient à l'observateur après avoir été réfléchi d'abord par la Terre et ensuite par la Lune (Figure 1.2). Observer la lumière cendrée est donc un peu regarder la Terre. Ce reflet est d'ailleurs appelé *Earthshine* en anglais, ce qu'on pourrait traduire mot-à-mot par « clair de Terre ».

L'information contenue dans la lumière cendrée a l'avantage d'être non résolue. En effet, étant donné que la surface de la Lune est irrégulière, elle réfléchit la lumière de manière diffuse. C'est donc la lumière provenant de toute la portion de la Terre qui arrive à l'observateur, indifférenciée. L'étude de la lumière cendrée est une manière très économique et efficace d'étudier la lumière émise et réfléchi par notre planète. Cela permet de se préparer en vue de i) la conception d'instruments qui étudieront les spectres de réflexion d'exoplanètes en lumière visible en isolant la lumière provenant de la planète comme les TPF³ et de ii) l'analyse de leurs résultats.

³ Le spectre d'émission de la Terre en infrarouge, observable à partir de satellites (Pearl and Christensen 1997), est quant à lui analogue aux observations que l'on pourrait faire du spectre thermique d'une exoplanète

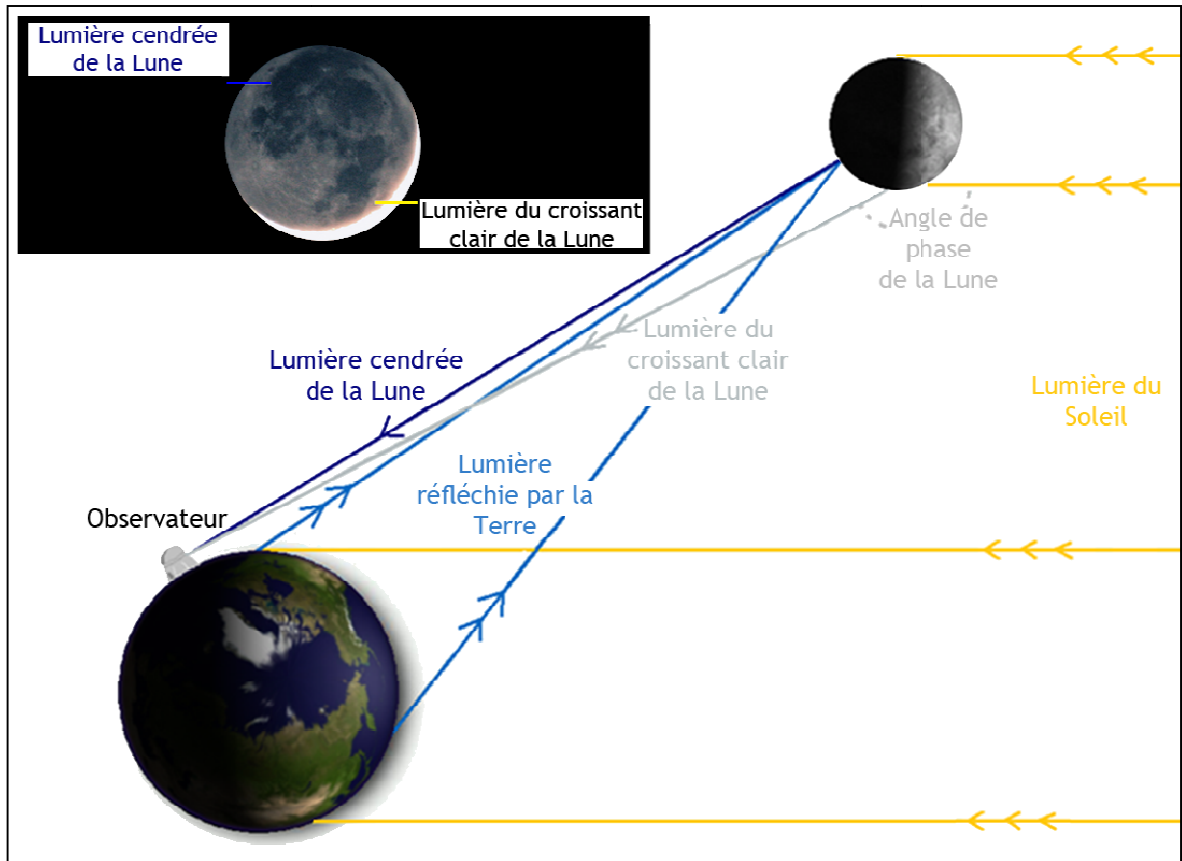


FIG. 1.2 - Géométrie du système Terre-Lune-Soleil, phénomène de la lumière cendrée. Encadré: Lumière cendrée et croissant de Lune.

On attribue souvent la première explication du phénomène de la lumière cendrée à Léonard de Vinci (1452-1519), qui l'a exposée élégamment dans son *Codex Leicester*. Dans les siècles qui ont suivi, la connaissance de la relation entre la lumière cendrée et la Terre s'est approfondie. Par exemple, au début du 17^{ème} siècle, Galilée (1564-1642) a fait l'affirmation, plus tard contestée, que la lumière cendrée du matin était plus brillante que celle du soir parce que les continents, en vue lors des observations du matin, réfléchissent plus que les océans, en vue le soir.

Au 20^{ème} siècle, l'utilisation des plaques photographiques a permis aux Français André-Louis Danjon et Jean Dubois de faire une étude plus soutenue des variations de l'albédo de

avec le TPF-I. Le spectre de transmission de la Terre, qu'on peut obtenir pendant des éclipses lunaires (Pallé *et al.* 2009), est analogue au spectre de transmission de l'atmosphère d'une exoplanète qui est déjà obtenu pour certaines exoplanètes qui transitent devant leur étoile.

la Terre grâce à la lumière cendrée. De telles études ont été reprises au début des années 2000 (Qiu *et al.* 2003). Dans un contexte astrobiologique, l'astronome russe avant-gardiste V.M. Arcichovsky avait déjà proposé il y a près de 100 ans de tenter la détection de la signature de la chlorophylle dans la lumière cendrée de la Lune afin de calibrer les observations faites sur d'autres planètes (Arcichovsky 1912). Dans la même période, l'astronome bélarusse Gavril Adrianovitch Tikhov (1865-1960), un précurseur dans le domaine de l'astrobiologie, réalise grâce à la photographie de la lumière cendrée avec différents filtres que la Terre, vue de l'espace, est bleue (Tikhov 1914).

Au début du 21^{ème} siècle, la détection des premières exoplanètes étant toute récente, il y a eu un regain d'intérêt pour l'utilisation de la lumière cendrée afin d'obtenir de l'information sur la Terre et ainsi acquérir des notions précieuses sur la détection à distance de signes de la vie. Des spectres de la Terre, obtenus par l'observation de la lumière cendrée de la Lune, ont été obtenus en ultraviolet proche, en lumière visible et en proche infrarouge avec diverses portions de la Terre contribuant à la réflexion (Arnold *et al.* 2002; Hamdani *et al.* 2006; Montañés Rodríguez *et al.* 2005; Montañés Rodríguez *et al.* 2006; Seager *et al.* 2005; Turnbull *et al.* 2006; Woolf *et al.* 2002). Ces premières études approfondies du spectre de la Terre vue comme une exoplanète ont permis d'identifier quantité d'indices, ou biomarqueurs, qui permettent de conclure à la présence de vie sur Terre. Ces mêmes indices pourraient servir dans l'étude d'une exoplanète analogue à la Terre.

1.2.4 Biomarqueurs spectroscopiques du spectre de la Terre

1.2.4.1 Biomarqueurs atmosphériques

Un biomarqueur, aussi appelé biosignature, est un élément qui, par sa seule présence ou encore par son abondance, suggère la présence de vie (Des Marais *et al.* 2002). Un biomarqueur peut être restreint à un lieu précis, comme le fossile d'une cellule ou la trace d'une molécule organique complexe, ce qui est peu intéressant pour la détection de vie hors du système solaire. Cependant, un biomarqueur peut aussi être distribué à grande échelle sur une planète. C'est le cas de molécules organiques simples ou de molécules inorganiques qui peuvent se trouver dans l'atmosphère d'une planète à cause d'un déséquilibre créé par le vivant (Hitchcock and Lovelock 1967).

Sur Terre, l'atmosphère a ainsi été grandement altérée par la vie, principalement par des organismes simples largement disséminées: les bactéries, les algues, etc. Dans un spectre de moyenne ($R=600$) ou de faible ($R=70$) résolution de la Terre, tels que ceux attendus d'instruments tel que le TPF-C, il est possible d'identifier des raies d'absorption dues à des molécules de l'atmosphère qui sont des biomarqueurs. Dans le visible/proche infrarouge, la plage accessible pour étudier le spectre de réflexion de la Terre grâce à la lumière cendrée, les principales molécules d'intérêt sont l'eau, l'oxygène et l'ozone (voir Tableau 1.1). D'autres biomarqueurs, comme le méthane et le dioxyde de carbone, seraient visibles dans cette région du spectre si leur abondance était plus grande.

TAB. 1.1 - Biomarqueurs spectraux atmosphériques dans le visible et le proche infrarouge

Biomarqueur	Abondance terrestre présente	Raies d'absorption	Résolution spectrale (nm)	Seuil de détection ⁴
H ₂ O	8000 ppm	720, 820, 940 nm 1.1, 1.4, 1.9 m	37, 35, 17 19, 11, 11	10 ppm
CO ₂	355 ppm	1.1, 1.2, 1.6 m	40, 34, 11	10%, 1%, 1000 ppm
O ₂	21%	630, 690, 760 nm 1.3 m	- , 54, 69 72	3%
O ₃	6 ppm	450 -740 nm	5	1ppm
CH ₄	2 ppm	700, 800, 890 nm 1.0 et 1.7 m	57, 29, 32 20,10	1000ppm to 1%

Tableau adapté de Des Marais *et al.* (2002)

La présence d'une molécule considérée comme un biomarqueur peut souvent être expliquée de manière abiotique, c'est-à-dire sans impliquer la vie, par exemple par des processus géologiques. Par conséquent, la détection, même en grande quantité, de la plupart de ces molécules ne serait pas une preuve hors de tout doute de présence de vie. Par contre, la détection simultanée de certains biomarqueurs dont la présence et la quantité ne peuvent

⁴ Abondance minimale pour détection avec $R=70$ et $S/N=25$

s'expliquer de manière abiotique par aucun modèle est beaucoup plus probante. Un tel exemple est la détection simultanée d'un gaz réducteur comme le méthane et d'un gaz oxydant comme le dioxygène ou l'ozone. Ces espèces réagissant rapidement ensemble, leur présence implique un renouvellement continu qui ne peut avoir comme source la vie (Lovelock 1975).

L'eau et le dioxyde de carbone

L'eau (H₂O) et le dioxyde de carbone (CO₂) ne sont pas à proprement parler des biomarqueurs, en ce sens qu'ils ne sont pas nécessairement le produit direct d'une espèce vivante. On retrouve d'ailleurs ces molécules dans la composition d'une variété d'objets astronomiques qui ne sont pas du tout favorables à la vie, comme des planètes gazeuses du système solaire. Cependant, ces molécules jouent un grand rôle dans l'habitabilité d'une planète terrestre, et donc, dans la chance d'y identifier une forme de vie. Sous forme gazeuse, l'eau et le dioxyde de carbone jouent un rôle crucial dans la régulation de la température d'une planète grâce, entre autres, à leur capacité de créer un effet de serre (Lammer *et al.* 2009). De plus, leur détection sous cette forme est un indicateur de leur présence probable à proximité de la surface, qui est essentielle puisque ces éléments sont la base des êtres vivants connus.

L'eau est relativement aisée à détecter dans le visible/proche infrarouge par ses larges raies d'absorption à 720, 820 et 940 nm, ainsi qu'à 1.14, 1.41 et 1.86 μm (voir Tableau 1.1), dont la profondeur augmente avec la longueur d'onde. Le gaz carbonique est indétectable dans le spectre de réflexion actuel de la Terre par ses bandes à 1.05, 1.21, 1.57 μm , mais pourrait être détecté sur une planète analogue à la Terre il y a 3.9 milliards d'années, alors que la concentration de ce gaz était plusieurs ordres de grandeur plus élevée qu'aujourd'hui.

L'oxygène, l'ozone

Le principal biomarqueur dans le spectre visible de la Terre est le dioxygène (O₂). Sur Terre, la fraction de l'oxygène de l'atmosphère qui provient de processus abiotiques est de l'ordre de 1/200 000 (Walker 1977). La grande majorité est rejetée par les plantes et certaines bactéries lors du processus de la photosynthèse, qui leur permet de produire efficacement des molécules organiques à partir du dioxyde de carbone, de l'hydrogène de

l'eau et du rayonnement solaire. L'oxygène ainsi créé est consommé dans le processus de respiration des eucaryotes, mais puisque des molécules complexes qui constituent le vivant finissent par être enfouies dans le sol dans le processus de sédimentation, il y a un apport net en oxygène dans l'atmosphère. La pertinence de l'oxygène comme biomarqueur provient aussi du fait qu'il réagit rapidement avec une variété de gaz réducteurs s'il n'y a pas de processus qui permettent son renouvellement. Or très peu de processus abiotiques connus permettent de créer cette molécule en grande quantité.

L'oxygène a des raies d'absorption très fortes dans le domaine visible, qui sont détectables même à des concentrations 7 fois moins élevées que la concentration actuelle sur Terre : en particulier la bande α à 630 nm, la bande B à 690 nm, la bande A à 760 nm et dans le proche infrarouge à 1.27 μ m. De plus, on peut détecter la présence de cette molécule par la raie entre 570 et 580 nm du complexe de van der Waals du dioxygène (O₂)₂. Cette molécule, aussi appelée *dimmer* de l'oxygène, est constituée de deux molécules de dioxygène liées par une faible interaction électrique.

L'ozone (O₃), produit en majorité par la photolyse de l'oxygène par le rayonnement UV du Soleil, est un traceur dit logarithmique de l'oxygène; cette molécule est détectable même à de faibles concentrations d'oxygène (Selsis *et al.* 2005). La bande de Chappuis de l'ozone, qui s'étend de 450 à 740 nm, a une profondeur qui augmente à peu près linéairement avec la quantité d'ozone. Cette raie peut être difficile à détecter sans ambiguïté puisqu'elle est située dans une région où la diffusion de Rayleigh et la diffusion par les aérosols est grande.

Le méthane

Presque tout le méthane (CH₄) de l'atmosphère terrestre (environ 1-2 ppm) provient du vivant. Cette concentration n'est pas assez grande pour permettre la détection de cette molécule dans le spectre terrestre actuel par ses bandes dans le visible et le proche infrarouge à 890 nm, 1.04 et 1.66 μ m. Pour une planète similaire à la Terre il y a 2.4 milliards d'années, moment où les bactéries méthanogènes ont contribué à augmenter la concentration de méthane à environ 1000 fois la concentration actuelle, ces raies seraient facilement observables (Kaltenegger *et al.* 2007). Cependant, ce biomarqueur est un peu

ambigu : puisque des processus abiotiques peuvent expliquer une forte proportion de méthane sur une planète rocheuse.

Une espèce ionisée : le calcium ionisé une fois

Dans le spectre de réflexion de la Terre, la présence de raies d'atomes ionisés comme le doublet du calcium ionisé une fois (CaII) à 393.4 et 396.8 nm est attribuable à l'ionosphère, cette couche de l'atmosphère qui est bombardée par le Soleil. L'ionosphère est indicative d'un champ magnétique, qui joue un rôle important dans la dynamique de la planète, et donc, de son habitabilité.

1.2.4.2 Un biomarqueur de surface : le *Vegetation Red Edge*

Un élément répandu à la surface et qui posséderait une signature très caractéristique pourrait en principe être détecté dans le spectre non résolu d'une planète. Cependant, les signatures de surface, plus susceptibles d'être cachées par des nuages et plus localisées que les biomarqueurs atmosphériques, sont généralement plus difficiles à détecter. Dans le visible, où la planète n'est pas elle-même brillante, la détection peut être favorisée puisque la fraction du signal qui provient d'une telle signature peut être importante par rapport à la surface éclairée qui contribue au signal (Seager and Ford 2005)

Sur Terre, tous les organismes photosynthétiques présentent une augmentation brusque de leur réflectivité autour de 700 nm due à la chlorophylle (Figures 1.3 et 1.4). Ce pigment absorbe une grande partie de la lumière UV/visible pour la photosynthèse, mais réfléchit la lumière infrarouge, inutilisée, afin de prévenir le réchauffement de la cellule qui entraînerait une perte d'eau et l'éventuelle altération du pigment (Gates *et al.* 1965). Cette signature, nommée *Vegetation Red Edge* (VRE), ce qu'on pourrait traduire par « remontée brusque de la réflectivité de la végétation dans le rouge », se trouve juste à l'extérieur de la vision de l'homme, mais est beaucoup plus distinctive que la bosse autour de 550 nm qui nous permet de voir les végétaux verts (Figure 1.3). Une telle signature pourrait donc servir de biomarqueur de surface.

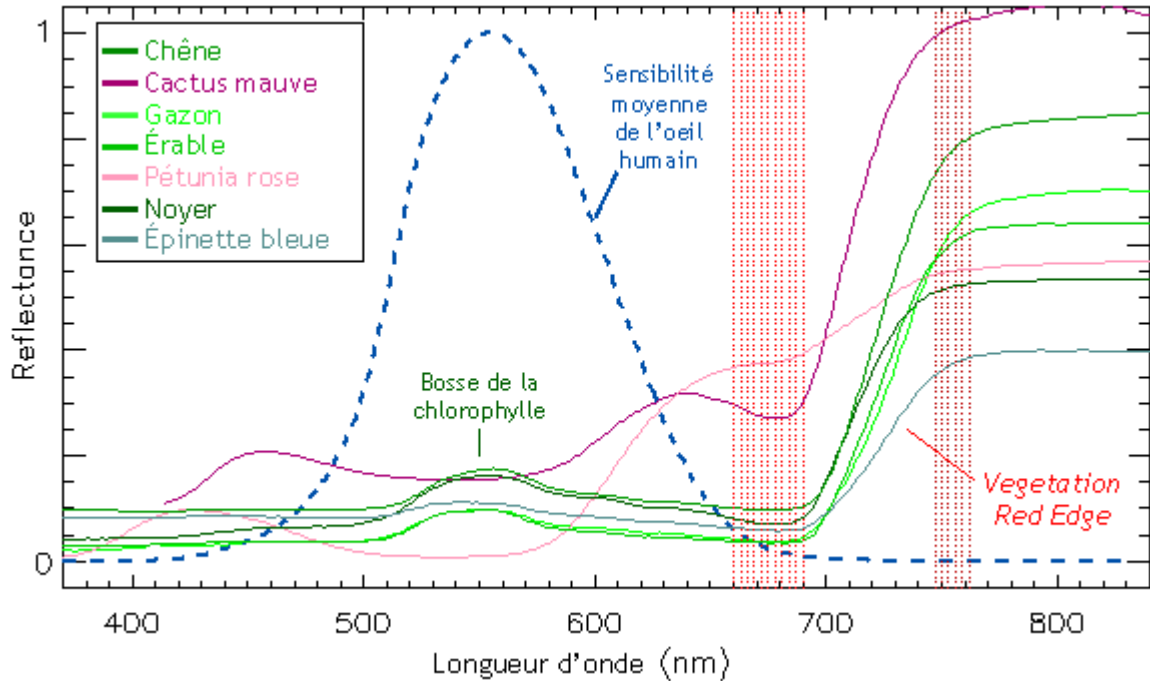


FIG. 1.3 - Le *Vegetation Red Edge* dans le spectre de réflexion de plusieurs organismes photosynthétiques. La sensibilité moyenne de la vision humaine, qui est nulle dans la région du VRE mais maximale dans la région de la bosse de la chlorophylle, est aussi représentée. Figure inspirée de Kiang *et al.* (2007b) et Seager *et al.* (2005) avec les données de Clark *et al.* (2007) et de Wyszecki and Stiles (1982).

Malheureusement, la végétation n'est pas le seul type de surface à montrer une augmentation autour de 700 nm. Les surfaces désertiques de même que certains types de nuages, comme les stratocumulus de basse altitude, montrent aussi une telle augmentation (Figure 1.4), qui, bien que moins radicale, peut contribuer à augmenter le VRE dans un spectre non résolu. De plus, certains matériaux qui, comme la végétation, auraient le potentiel d'être répandus à la surface, présentent des remontées brusques de leur réflectivité dont la signature pourrait ressembler à celle du VRE. C'est le cas de plusieurs minéraux comme le cinabre (HgS), qui réfléchit intensément au-delà de 600 nm, d'où sa couleur rouge très prononcée, ou encore les cristaux de soufre (S), qui ont une forte couleur jaune étant donné leur réflectivité élevée au-delà de 400 nm.

Finalement, il est impossible de savoir si le mécanisme qui crée le VRE chez les organismes terrestres est un mécanisme universel. En fait, même s'il l'était, tout indique

que la position d'une telle signature pourrait se trouver à une toute autre longueur d'onde selon le type d'étoile ou la nature de l'atmosphère de la planète (Kiang *et al.* 2007a). Sur Terre déjà, la position exacte du VRE autour de 700 nm varie selon les espèces photosynthétiques (Figure 1.3) et il existe d'autres pigments que la chlorophylle, comme le β -carotène, qui jouent un rôle semblable à différentes longueurs d'onde (Kiang *et al.* 2007b; Seager *et al.* 2005).

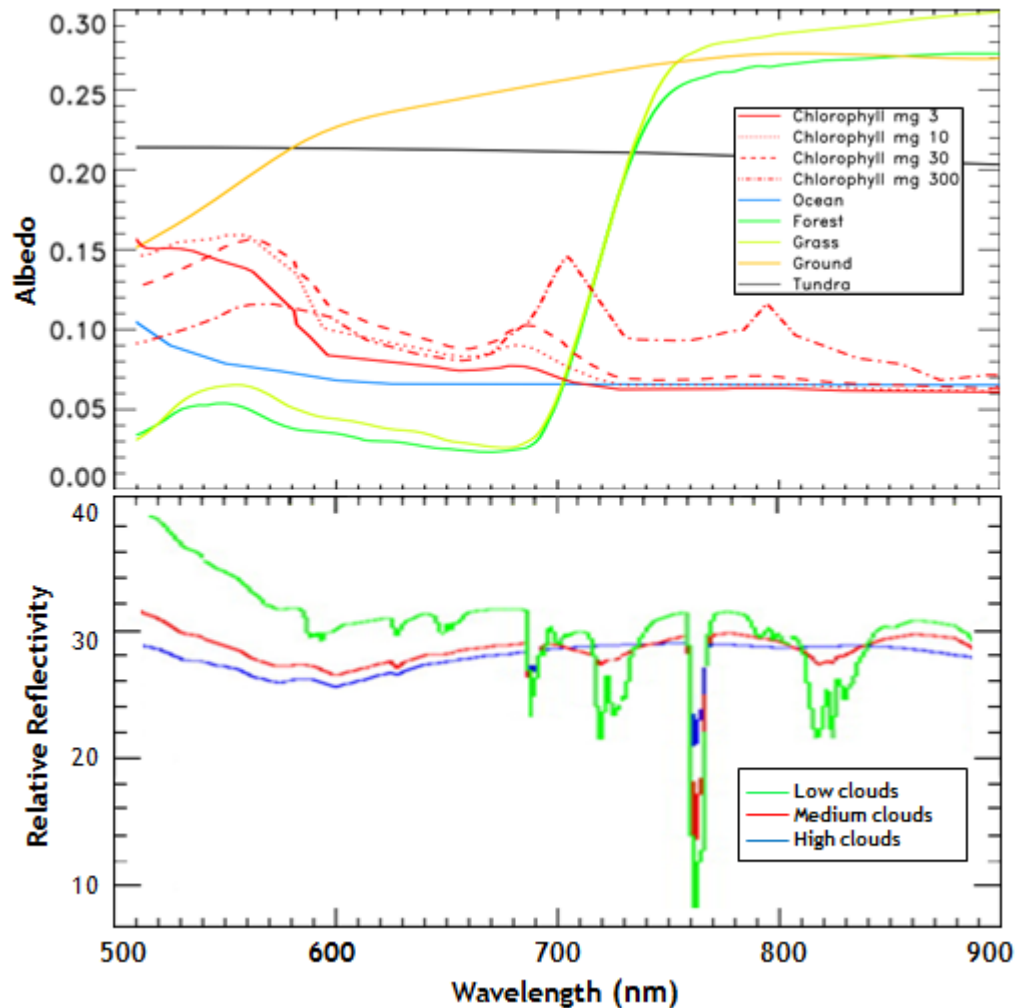


FIG. 1.4 – HAUT : Signature spectrale de quelques types de surface : la toundra (noir), un océan stérile (bleu) et avec différentes concentrations de plancton (rouge), la forêt (vert), le gazon (vert-jaune), le sol sans végétation (jaune). La glace, dont l'albédo est d'environ 0.8 et décroît légèrement avec la longueur d'onde dans le visible, n'est pas représentée. BAS : Signature spectrale de nuages de différentes altitudes : basse (vert), moyenne (rouge), haute (bleu). Figures tirées de Tinetti *et al.* (2006b) et de Kaltenegger *et al.* (2007).

1.3 Variabilité des biomarqueurs dans le spectre de réflexion de la Terre : présentation de l'article et de l'annexe

Malgré les réserves énumérées plus haut, le VRE, une signature directe de la vie, présente un intérêt indéniable. La détection d'une signature analogue, couplée à la détection d'une combinaison des biomarqueurs atmosphériques énumérés plus tôt constituerait l'une des plus fortes suggestions de vie que l'on puisse détecter à distance.

Ces signatures ont donc été recherchées dans le spectre non résolu de la lumière réfléchie de la Terre obtenu par la lumière cendrée. Ainsi, par exemple, des chercheurs de l'Observatoire de Haute Provence ont obtenu le spectre visible de la lumière cendrée d'août à octobre 2001 (Arnold *et al.* 2002). Ils ont identifié dans les spectres obtenus lors de cinq nuits la diffusion de Rayleigh due à l'atmosphère, ainsi que la signature de l'oxygène, de l'ozone et de la vapeur d'eau. Ils mesurent un VRE entre 4 et 10%, avec une erreur de l'ordre de 3-5%, similaire quoique légèrement inférieure à la valeur qu'ils évaluent théoriquement. Ce travail précurseur a été suivi d'une étude plus poussée à partir du NTT à la Silla, au Chili (Hamdani *et al.* 2006). Le régime spectral a été étendu au proche infrarouge et au proche UV, et plusieurs corrections ont été faites pour déterminer le VRE, estimé dans cet article entre 1.3 et 4%, avec une erreur de l'ordre du pourcent

En 2002, un autre groupe a publié une étude du spectre entre 480 et 920 nm faite au télescope de 2.3m de Kitt Peak, en Arizona (Woolf *et al.* 2002). Ce spectre est comparé à un modèle théorique simple. Même si la phase de la Terre contribuant au spectre est en grande partie constituée de l'océan Pacifique, un VRE de 6% est mesuré, ce qui est probablement dû à l'absence de correction du spectre avant la mesure. En 2006, le même groupe a joint à ce spectre la portion dans l'infrarouge proche, entre 700 et 2400 nm, obtenue au télescope de 1.8 m du Mont Graham, en Arizona (Turnbull *et al.* 2006). Ils y identifient des signatures du dioxyde de carbone et du méthane, ainsi que plusieurs raies spectrales de l'eau et deux d'oxygène.

En 2005, un troisième groupe publie un spectre obtenu en observant la lumière cendrée avec le télescope de 3.5m de l'observatoire Apache point, au Nouveau Mexique. Ces observations appuient une vaste étude théorique sur la détectabilité du VRE (Seager *et al.* 2005). Finalement, en 2005, un autre groupe de chercheurs publie les spectres visibles obtenus lors d'une nuit d'observation au télescope de 1.52 m de Palomar en novembre 2003. L'évolution d'heure en heure du spectre est montrée entre 10.47UT et 13.08UT et comparée au spectre moyen (Montañés Rodríguez *et al.* 2005). En 2006, ils comparent ces spectres aux données de couverture nuageuse et établissent que la variation du VRE, entre 2.2 et 2.8%, est corrélée avec la variation de l'aire couverte par de la végétation et non cachée par les nuages (Montañés Rodríguez *et al.* 2006). Plus récemment, ce même groupe a étudié le spectre en transmission de la Terre entre 400 et 2500 nm en exploitant la lumière de la Lune pendant une éclipse de Lune. Ils ont trouvé la signature de plusieurs biosignatures atmosphériques, dont certaines comme des espèces ionisées n'avaient pas été trouvées dans le spectre de réflexion jusqu'à présent (Pallé *et al.* 2009).

D'après toutes les recherches mentionnées, l'augmentation de la luminosité due à la végétation est détectable mais faible, entre 0 et 10% (Arnold 2008). Cette valeur relativement faible s'explique par la couverture limitée de la végétation sur la planète. À noter que dans un spectre non résolu de la Terre, le phytoplancton et autres organismes photosynthétiques dans les océans ont un apport très limité au VRE étant donné que l'eau et les particules en suspension dans celle-ci absorbent presque toutes les signatures dont l'origine se trouve sous la surface (Tinetti *et al.* 2006a). De plus, les nuages, qui masquent la signature du VRE, sont souvent situés au-dessus des zones de végétation. Lorsqu'une plus petite portion de l'hémisphère est éclairée, la végétation peut occuper un plus grand pourcentage de cette portion et le VRE peut se distinguer plus facilement. Selon Montañés Rodríguez *et al.* (2006), la végétation qui n'est pas recouverte de nuages représente en moyenne 10 à 18% de l'hémisphère de la Terre qui est éclairé.

Jusqu'à ce jour, les observations ont été limitées au plus à quelques nuits. Une des conclusions qui revient souvent est la nécessité d'étudier le spectre sur une plus longue période et plus fréquemment. En effet, pour observer une signature, en particulier une signature de surface comme le VRE, et donner un sens aux observations, la variabilité

temporelle est un ingrédient clé. Suivre l'évolution d'une variation franche de réflectivité et corrélérer la variation avec la rotation de la planète permettrait d'associer la signature à la surface (Seager and Ford 2005). Plusieurs projets ont donc été proposés pour suivre plus méthodiquement l'évolution du spectre de la Terre grâce à la lumière cendrée, mais aucun n'a encore produit de résultats.

Dans le cadre de ce projet, les biomarqueurs atmosphériques et de surface du spectre de réflexion de la Terre sont étudiés sur une période d'environ un an et demi. L'article du Chapitre 2 présente les observations de 8 nuits accumulées entre juillet 2008 et novembre 2009. Tous les détails des observations effectuées se trouvent au Tableau 2.1. La méthode de réduction des spectres est présentée et plusieurs biomarqueurs atmosphériques sont identifiés dans les spectres obtenus, présentés aux Figures 2.1 à 2.3. Tous les spectres sont présentés à la Figure 2.5. La méthode pour éliminer les contributions indésirables afin d'évaluer correctement le VRE est présentée (Figure 2.4). Les spectres traités de 5 nuits pour lesquels le rapport signal sur bruit est élevé sont présentés à la Figure 2.6, la liste des VRE associés à ces spectres est faite au Tableau 2.2. La variation du VRE est ensuite étudiée selon la phase de la Terre en vue et la couverture nuageuse lors des observations. L'annexe présente les détails techniques qui sont propres à l'observation de la lumière cendrée de la Lune, un objet très proche et très brillant, ainsi que les astuces requises pour en tirer des spectres de la Terre.

Chapitre 2

Biomarkers variation in the unresolved optical spectrum of the Earth

M.-E. Naud¹, R. Lamontagne¹, F. Wesemael¹

To be submitted to *Astrobiology*

December 2010

¹ Département de Physique, Université de Montréal, and Centre de Recherche en Astrophysique du Québec (CRAQ), C.P. 6128, Succ. Centre-Ville, Montréal, Québec, H3C 3J7, Canada.

Abstract

We present new medium-resolution ($\Delta\lambda \sim 0.6$ nm/pixel) unresolved spectra of the Earth in the range 400-900 nm, secured by observing the Earthshine with the 1.6 m telescope at the Observatoire du Mont-Mégantic between 28 July 2008 and 22 November 2009. Our objective was to follow, over that time span, the changes in the spectral signature of various biomarkers. Our spectra include coverage of several water, oxygen and ozone features already reported in earlier investigations of the Earthshine, as well as the signature of singly ionized calcium, an element associated with the ionosphere. The strongest water and oxygen bands observed do remain detectable in spectra when the resolution is degraded to $\Delta\lambda \sim 10$ nm/pixel, a value characteristic of the first generation of space-based spectrographs. Among the biomarkers identified, the oxygen A band (760 nm) displays the largest variability over the 16 month period, while the variation of the B band at 690 nm is more subtle. We also detect variations in the blue continuum slope of the Earthshine spectrum likely to be associated with changes in the relative importance of various scattering processes in the atmosphere. The Vegetation Red Edge is shown to exhibit variations, over that time span, from -5 ± 5 % to 15 ± 5 %, where the quoted error is an estimated internal error. The VRE values appear well correlated with the amount of visible vegetation at the phase of the Earth contributing to the spectra.

Key words: Earthshine — Vegetation Red Edge — Spectroscopic biosignatures — Extrasolar planet

2.1. Introduction

One of the major goals of astrobiology is to find a habitable terrestrial exoplanet that could harbour life. To evaluate the habitability and the possibility of life on exoplanets, the best way is to isolate the light they emit or reflect and to analyze it through photometric, spectroscopic, and polarimetric means. The development of instruments like the Terrestrial Planet Finder interferometer, coronagraph or occulter (TPF-I, TPF-C, TPF-O), that will be dedicated to the direct detection and spectral characterization of potential habitable exoplanets, will be a priority of the next decades (Schneider *et al.* 2010). The TPF-C and TPF-O will operate in the optical portion of the spectrum, while the TPF-I will study the thermal infrared. An external occulter could also be used with an existing telescope, like the *James Webb Space Telescope*.

To get prepared to analyze wisely the spectra obtained with these instruments, it is essential to study the only inhabited planet we know, the Earth, as if it were an exoplanet itself. This idea, to study our planet as a proxy for inhabited exoplanets, was suggested in the 1960s, when clues of habitability and presence of life were looked for in pictures of the Earth taken by meteorological satellites and manned spacecrafts (Kilston *et al.* 1966; Sagan and Wallace 1971). The concept was further popularized in the early 1990s with the study of data taken by the *Galileo* spacecraft during a close flyby of the Earth (Sagan *et al.* 1993).

There is a particular interest in studying the Earth as an unresolved disk, since it is as a single pixel that the first exoplanets will likely be studied. A combination of resolved satellite spectra could, in principle, mimic a global Earth spectrum, but achieving a representative and realistic combination would represent quite a challenge (Seager and Ford 2005). In the late 1990s and in the 2000s, several spacecrafts provided spatially unresolved spectra of the Earth. The

spectral signatures of atmospheric biomarkers (or biosignatures), namely atmospheric molecules that could indicate the habitability and/or the presence of life, like O₂, O₃, and H₂O (Des Marais *et al.* 2002), were found in the infrared spectra of the Earth taken by *Mars Global Surveyor* in 1996 (Christensen and Pearl 1997). They were also present in the low resolution visible and near-infrared spectroscopic data gathered by *Mars Express* in 2003 (European Space Agency 2003; Tinetti *et al.* 2006a). Recently, *Venus Express*, launched in 2005, was used to monitor the Earth on a regular basis (this effort is briefly described in European Space Agency 2008). That study is an exception among spacecraft studies, because the high cost of spacecrafts usually limits involvement in monitoring of the Earth.

A convenient way to study the Earth's spectrum at much lower cost is to look at the Earthshine, the weak glow produced by sunlight reflected from the surface of our planet on the otherwise dark side of the Moon's disk. The Earthshine (ES) spectrum being a superposition of the spectra of the Sun, of the Earth and of the Moon, it can be divided by the Moonshine (MS) spectrum to isolate the Earth's reflection spectrum, since the MS only contains contributions from the Moon and the Sun. The use of the Earthshine to learn more about the Earth in order to transfer this knowledge to the observation of other planets was already proposed a hundred years ago (Arcichovsky 1912). However, the blooming of exoplanet science over the last 15 years led to a renewed interest in Earthshine observation. Using this method, the spectrum of the Earth was obtained in the optical and near-infrared (Arnold *et al.* 2002; Woolf *et al.* 2002; Montañés-Rodríguez *et al.* 2005; Seager *et al.* 2005; Hamdani *et al.* 2006; Montañés-Rodríguez *et al.* 2006; Turnbull *et al.* 2006). Using the Earth as a proxy, these studies all showed the possibility of detecting the same atmospheric biomarkers discussed above in unresolved spectra of the Earth.

These recent studies of the ES also attempted the detection of an additional surface biomarker, the Vegetation Red Edge (VRE), that is caused by photosynthetic organisms living on the Earth. These organisms all show a very distinctive and abrupt increase of up to a factor of five or more in their reflectivity spectrum around 700 nm (Kiang *et al.* 2007). This feature is indeed much stronger than the chlorophyll bump that makes the vegetation green to the human eye. It was recognized very early that the VRE could be a way to detect the vegetation on a planet, and it was searched for in early attempts to detect signs of vegetation on Mars (e.g., Slipher 1924). In the unresolved spectrum of the Earth, the rise is expected to be much more modest, since the vegetation is limited to portions of the reflecting surface that can, sometimes, be hidden by clouds. According to Arnold (2008), who summarizes the results of Earthshine observations and modelling, the VRE is detectable in the disk-averaged spectrum of the Earth as a rise of a few percents (0-10%) around 700 nm. A spectral resolution in excess of $R \sim 50$ is thought to be necessary to detect the VRE, and to distinguish it clearly from other, smoother signatures.

It has been suggested repeatedly that long term studies would be a crucial asset to identify features of life on exoplanets. A consideration of the temporal variations of a spectrum might allow us to disentangle how various factors like the changing phase in sight, the changing cloud pattern or the rotation period influence the data. In this contribution, we present and discuss a homogeneous set of Earthshine spectra secured over a period of 16 months from a single site. In section 2 we present the observations and the details of our data processing. In section 3, the results of our analysis of the various biomarkers identified are presented. An analysis and interpretation of these results is presented in section 4, while section 5 presents our concluding remarks.

2.2. Observations and data processing

2.2.1 Observations

The 1.6 m Ritchey-Chretien telescope (f/8) at the Observatoire du Mont-Mégantic (Québec; 45°27'18"N 71°9'12"W) was used with an optical spectrograph and a 300 l mm⁻¹ grating. The 7 arcmin spectrograph slit was closed to its narrowest width, covering 2.4 arcsec on the sky. The detector used was a STA0520A, a thinned 2688x512 pixels CCD, optimized in the 400-450 nm region. This setup allowed a maximum simultaneous coverage of the ~350-950 nm range with a spatial sampling of 1.242 arcsec/pixel and a spectral sampling of about 0.34 nm/pixel (R~2000 at 700 nm).

Between 28 July 2008 and 22 November 2009, in the limited periods when the crescent Moon was not too bright (15-40% illumination), we secured data on eight different nights, four before new Moon (phase angle: 109° to 130°) and four after (phase angle: -125° to -105°). The longitude of the observatory is such that a few days before new Moon, the phase of the Earth contributing to the spectra includes the Pacific Ocean and the Americas, while a few days after it, it includes Africa, Europe and the Atlantic Ocean. Table 2.1 summarizes relevant information concerning our observations.

On each night, during the time the Moon was visible (a few hours at best), typically 5-10 spectra were taken with the spectrograph slit positioned on Earthshine (ES) and its adjacent sky. Moonshine (MS) spectra were taken before and after each ES spectrum. Both types of spectra make use of the same set-up, and the typical exposure times are ~1 s for a single MS pose and a few hundred seconds for a single ES pose.

2.2.2 Data reduction

Data reduction was performed using IDLTM and IRAF. Standard steps including bias subtraction, identification of cosmic rays and bad pixels and distortion rectification were first applied. Two additional corrections, detailed below, were also applied to our data.

Fringe elimination

A strong fringe pattern, starting around $\lambda=650$ nm, appeared in all of our data and had to be removed. Unfortunately, a small but significant spectral shift appears between the fringe pattern from the dome flat images and the pattern in the ES and MS images. This shift results from a difference in the optical pathways of the calibration and science data and prevents direct correction of the fringe pattern using the dome flats. To circumvent this problem, we used a median filter to split the normalized dome flat into two distinct images: one containing its low spatial frequency variations, the fringe pattern, and one its high spatial, the pixel to pixel variations. We then shifted the low-frequency image along the spectral axis to determine the optimal match to the fringe patterns of our ES and MS images. All our science images were then divided by a flat composed of this shifted low frequency version and of the original high frequency portion. This process eliminated most of the fringes without affecting the standard flat-fielding procedure.

Sky subtraction

To remove the scattered light near the Moon from ES spectra, we followed a method similar to that of Hamdani *et al.* (2006). For each wavelength, a linear fit of the section of the image containing the sky was extrapolated and removed from the Moon section. The residual fringes are not symmetric with respect to the boundary sky-Moon. The subtraction of the sky with this method thus had the

negative effect of amplifying the noise due to fringing. The MS sky spectra fluxes were always less than a few percent of the MS Moon spectra fluxes and were not removed.

Extraction of the final spectra

Each individual Earthshine and Moonshine spectrum was extracted using a weighted average of a few dozen spectral lines. Spectra were then wavelength calibrated, trimmed to the final wavelength range and corrected individually for extinction. Following Hamdani *et al.* (2006), Moonshine spectra were color corrected to take into account the spectral reflection variations of the Moon with phase angle. We used the updated version of the data of Lane and Irvine (1973) provided by Korokhin *et al.* (2007) to extrapolate a spectral correction at the phase angle of each MS spectrum.

The Earth reflection (ER) spectrum is calculated from ES and MS spectra according to equation (1)

$$ER(\lambda) = \frac{ES(\lambda)}{MS(\lambda)}, \quad (1)$$

where $ES(\lambda)$ is a weighted average – based on the average flux of each spectrum before normalization – of the spectra taken within a period of 15-20 minutes and $MS(\lambda)$ a weighted average of the MS spectra taken before and after a given ES spectrum, the weighting factor being function of the time interval between individual MS and ES spectra.

The resulting ER spectra have a nominal spectral resolution of about $\Delta\lambda = 0.34$ nm/pix ($R = \lambda/\Delta\lambda \sim 2000$ at 700 nm). The values of the signal to noise (S/N) ratio listed in Table 2.1 were measured on these reduced spectra in the range 660-680 nm. To eliminate the portion of the spectra where there was not

enough signal, the spectra were cut where the ratio of the flux to the maximal flux multiplied by the maximum S/N was under 3. Finally, the spectra were convolved to a reduced resolution between $\Delta\lambda = 0.6$ nm/pix and $\Delta\lambda = 3$ nm/pix, according to their S/N ratio. For spectra for which the residual fringing was severe, a different and poorer resolution was adopted above 770 nm. The final resolutions are listed in Table 2.1.

2.3. Results

2.3.1 Atmospheric biomarker signatures in the optical reflection spectrum

We first constructed a high S/N ratio Earth reflection spectrum based on one single night of data. The resulting spectrum, shown in Figure 2.1, consists of an average computed from all the ER spectra secured between 7:48UT and 8:17UT on 19 May 2009 (see Table 2.1 for details). Several features of the Earth's atmosphere, already detected in earlier investigations of the Earthshine, are readily seen. For completeness, we first discuss these briefly.

The sharp increase below 600 nm results from a combination of Rayleigh scattering on small molecules of gas in the air and scattering by liquid water droplets and dust in suspension (aerosols). Several molecular species, indicative of life, habitability or both, are also seen. Water is identified on the basis of its broad bands in the regions 640-660 nm, 715-740 nm and 810-845 nm, whose depth increases with increasing wavelength. Another strong water band starting around 900 nm can also be seen as a decrease of the signal at the red end of our spectrum, as well as the weaker water bands in the 690-710 nm and 685-810 nm regions. Oxygen, a by-product of photosynthesis, was identified early as a very significant biomarker in the Earth's spectrum (Owen 1980; Leger *et al.* 1994).

This molecule shows narrow bands in the optical range at 630 nm (O_2 - α band) and at 690 nm (O_2 -B band), as well as a strong band at 760 nm, the O_2 -A band, all clearly seen in our spectrum.

Ozone, produced by the photolysis of oxygen, can be detected for very low concentrations of this molecule, even when the oxygen itself cannot be detected (Selsis *et al.* 2005). Ozone is a good indicator of the presence of oxygen, but not a good quantitative marker of this molecule. The signature of ozone is observable in our spectrum by its wide and shallow Chappuis band, covering the whole blue range from about 440 to 800 nm, with maximal absorption around 600 nm. However, this feature is superposed onto the Rayleigh and aerosol scattering signatures in the blue portion of the spectrum and the contributions of these signatures are hard to disentangle without precise modeling. Nevertheless, this ozone feature remains an interesting biomarker, because its width makes it easier to detect at very low spectral resolution and also because, in contrast to most bands, its depth increases roughly linearly with ozone concentration (Des Marais *et al.* 2002).

In our high S/N optical spectrum, the signature of the oxygen collision complex, also called oxygen “dimmer”, $(O_2)_2$, is seen between 570-580 nm (Tinetti *et al.* 2006a). The dimmers, weakly bound molecules, were recently unveiled as powerful sources of information about the atmosphere of a planet studied via its transmission spectrum (Pallé *et al.* 2009). The dimmer signature is relatively faint in our spectra, and is only observed in those runs characterized by a high S/N ratio.

Ionized atoms from an upper layer of the atmosphere, the ionosphere, can also be considered as spectral atmospheric biomarkers because they give information about the presence of a magnetic field, an ingredient thought to be crucial for the protection and dynamics of the Earth’s biosphere (Brack *et al.* 2010). Pallé *et al.* (2009) show that some of these atoms have visible absorption

lines in the transmission spectrum of the Earth. Here, the blue end of some of our reflection spectra does show the singly ionized Ca II H and K lines at 393.4 and 396.8 nm. Since the region below 400 nm is outside the wavelength region we targeted initially, the S/N ratio is not always high enough down to 390 nm to allow detection, but some spectra, like that of 28 February/1 March 2009 shown in 2.2, display these components. The correct elimination of other solar features, like H α at 658 nm, suggests that the Ca II lines do originate in the Earth's atmosphere.

In Figure 2.3, we have median-averaged the spectrum of Figure 2.1 to reproduce the lower spectral resolution characteristics of the first generation space-based spectrographs that will secure spectra of exoplanets (about 10 nm/pixel, or $R=70$ at 700 nm). The typical shape associated with Rayleigh scattering remains easy to detect, and gives an indication of the presence of an atmosphere. Molecular bands of oxygen, mainly the very deep one at 760 nm, are still detectable, as are the strongest bands of water. The Ca II lines, out of the range presented, are very narrow and not visible at this poorer resolution. The other features discussed earlier are also lost.

2.3.2 Surface biomarker signature: the Vegetation Red Edge

The VRE is spectral feature of interest whose presence can, in principle, be detected in a disk-average spectrum of the Earth (Figure 2.1) as an increase in reflectivity around 700 nm. However, the correct quantitative measurement of this VRE via the computation of the slope of the spectrum in that region is complicated by the presence of several other features in the same spectral range. Narrow and/or weak bands like the O₂- α band at 630 nm or water at 720 nm are easily avoided, but the broad ozone Chappuis band and the Rayleigh and aerosol

scattering, whose wide signatures must be characterized by a variable intensity, have to be carefully removed in order to properly set the continuum level.

To remove these absorption sources from our spectra, we followed a method similar to that of Hamdani *et al.* (2006). We first evaluated the shape of the ozone absorption between 230-850 nm using the cross-section given in Voigt *et al.* (2001) for a range of plausible column densities. We then divided the spectrum by the ozone absorption spectrum for each of these densities. We then fitted this spectrum in the continuum regions between 500 and 685 nm with a Rayleigh-aerosol scattering function of the form

$$R(\lambda) = a + b \left(\frac{1}{\lambda^4} + \frac{1}{700^{2.7} \lambda^{1.3}} \right), \quad (2)$$

similar to that proposed by Hamdani *et al.* (2006). Aerosol scattering has a dependence that varies from $1/\lambda^2$ to $1/\lambda$. Our fit was not sensitive to the choice of exponent in the range 1-2, and the adopted value of 1.3, is taken from Woolf *et al.* (2002). The Rayleigh absorption contribution in $1/\lambda^4$ is considered equal to that in $1/\lambda^{1.3}$ associated with aerosol scattering around 700 nm, as suggested by Léna *et al.* (1996). The optimal column density is that for which the corrected spectrum is best fitted by the Rayleigh-aerosol function. We repeated the process iteratively until the column density was known to an accuracy of about 1 %, satisfactory for our purpose. In the analysis of our various data sets, spread over a period of 16 months, we found optimal ozone column densities between $\sim 2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ and $\sim 9 \times 10^{19} \text{ cm}^{-2}$. Our estimates of the ozone column density could be affected by other contributions to the spectrum that were neglected in the fitting, such as the contribution of scattering off the oceans. The spectral signature of oceans, characterized by a $10^{-(\lambda-\lambda_0)/\Delta\lambda}$ form, with $\lambda_0 = 550 \text{ nm}$ and $\Delta\lambda =$

130 nm (Woolf *et al.* 2002), could account for a steeper spectral dependence on wavelength below 500 nm.

The spectrum of 19 May 2009 (Figure 2.1) and that of 28 February/1 March 2009 (Figure 2.2) are displayed in Figure 2.4, with the contributions of ozone absorption, and Rayleigh and aerosol scattering removed. In these corrected spectra, the VRE can be computed on the basis of the values of the reflectance obtained by averaging data in a 20 nm region around 670 nm and in a 10 nm near-infrared region around 750 nm. The VRE is then obtained from Equation (3),

$$VRE = \frac{r_I - r_R}{r_R}, \quad (3)$$

where r_I and r_R are, respectively, the near-infrared and red reflectance integrated over the relevant spectral domain (10 or 20 nm). Table 2.2 provides a list of the VRE values we have measured.

Estimating the errors associated with the values of the VRE is a difficult process, as many distinct steps are involved in the measurement of the index. We carried out several experiments to estimate the influence of the critical steps in the reduction process and in the computation of the VRE to estimate an internal error.

The sky subtraction procedure is one of the most important sources of uncertainty. If a smaller region of the sky is used, the VRE can vary by ± 1 percentage point. If the slope of the linear fit is smoothed to reduce the noise as in Hamdani (2006), or if different sets of CCD spectrum lines are used to obtain the ES and MS spectra, the VRE is affected at the level of 1.5 percentage points in each case. Not correcting for the changing color of the moon yields results which are on average 1 percentage point lower than our nominal value. In addition to providing an estimate of the difference expected between our results and some of the earlier investigations that did not include the correction (e.g. Arnold *et al.*

2002), this figure indicates that the limited number of data points used to make that correction is probably not a major source of error. One very sensitive step is the way we remove the Rayleigh scattering and the ozone Chappuis band. Omitting this correction can have a large effect on the results, and modern results should not be compared directly with earlier works that did not remove these contributions. Several tests were carried out before choosing the spectral range of the fit, and the incidence of this parameter is at the level of ± 3 percentage points. A similar uncertainty is associated with the choice of the spectral range over which the VRE is computed.

On the basis of these experiments, we estimate that the internal error on our VRE is of the order of ± 5 percentage points, a value similar to the error quoted by Hamdani et al. (2006). The VRE values in our analysis were all computed in a consistent manner, and should be directly comparable to each other. Indeed, the coarse examination of the results obtained in the course of a given night, and from one night to the other, reveals no obvious inconsistency. A comparison of our results with VRE values extracted from other sources, such as those summarized by Arnold (2008), is more problematic, as different instruments and reduction procedures are likely to be involved, as mentioned earlier, and the external error, difficult to estimate at this stage, is likely to dominate the error budget.

2.3.3 Variations of the atmospheric biomarkers

The ES spectrum observed from a given location depends on the contributing fraction of the Earth surface, and thus varies according to the relative position of the Earth, the Moon, and the Sun. This provides an interesting analogy to the expected variability of exoplanet spectra secured at different positions along the orbit (Montañés-Rodríguez *et al.* 2006). The fraction of the planetary surface reflecting starlight is expected to change both in size and in its physical

properties, and the associated spectroscopic variations could reveal useful information about the planet. While the variations associated with the orbital changes are assuredly the most significant, it is not impossible that longer term secular variations might also someday become detectable, both in the Earthshine and in exoplanet spectra. However, this will require careful monitoring of spectral variations using a very stable system, a goal beyond the scope of the present exploratory investigation.

Molecular species

We show, in Figure 2,5, median spectra obtained on eight different nights of observation spanning a period of 16 months. This homogeneous set of spectra, secured at a single site and with the same instrumental setup, provides the best qualitative overview of the variation with time - and thus with the phase of the Earth in view - of the biomarker signatures in the Earth spectrum. The varying strength of a spectral line is usually not a direct indicator of the concentration of the species because the depth of molecular lines varies both with the abundance of the molecule – usually with the square root of the column density - and with the atmospheric pressure – usually linearly. While only careful spectral synthesis could help pinpoint the pressure and column density associated with the molecular features observed in our spectra, a qualitative discussion is possible. The oxygen A band at 760 nm is strong in all spectra but is, for example, considerably more pronounced in that of 12 October 2009 than in that of 29 April 2009. The variation of the B band at 690 nm is more subtle, while the weaker α band (630 nm) is hardly seen in the noisiest spectra, like that secured on 22 November 2009. We are in no position to evaluate the variability of the ionized calcium lines (not shown here), as these were only observed in the spectra with a high enough S/N ratio in blue optical region.

The spectral shape in the blue region varies considerably in these spectra. While some variation could be associated with rapidly varying meteorological conditions at the observation site, it is likely that much of that effect has been removed by working with the median spectrum for each night. More relevant, perhaps, is the fact that the intrinsic shape of the spectrum of the Earth *is expected* to change over time scales of days to months according to i) the abundance of aerosols in the atmosphere, and ii) the abundance and altitude of clouds. When the Earth is covered with clouds, the slope of the spectrum is flatter, since the scattering by liquid droplets or dust in clouds is much less wavelength-dependant than the usual Rayleigh scattering. In this case, the Earth appears white rather than blue. While it is likely that the observed variations in spectral shape can be interpreted in terms of changes in the relative importance of various scattering processes in the atmosphere, the stability of the data acquisition and reduction procedures over periods of several months remains of some concern and needs to be further investigated.

The Vegetation Red Edge

Our study of the variability of the VRE relies on a subsample of our spectra, since it was not possible to find an adequate aerosol/Chappuis band fit for the median spectra of three of the eight nights (those of 28 April, 29 February, and 22 November 2009). These three nights had in common a lower resulting S/N ratio because of the presence of an important residual fringe pattern in their spectra as well as of a significant area of ocean at the phase of the Earth contributing to the spectra. As discussed above, the presence of a large ocean area at some phases might lead to an improper removal of the contributions of ozone absorption, and of Rayleigh and aerosol scattering.

Figure 2.6 presents the spectra for the five nights for which it was possible to remove satisfactorily the Rayleigh-aerosol scattering and the ozone Chappuis

band. The phase of the Earth contributing to the Earthshine is shown, with a map of the vegetation cover at the time of the observations projected on it. The closest cloud covers available are also presented. For these spectra, the VRE slopes, listed in Table 2.2, show a good correlation with the presence of vegetation-covered land in sight. The spectra of 28 July 2008, 19 May and 17 June 2009 show a large amount of vegetation, and all have a high VRE. That of 28 February 2009 has a very low VRE that is consistent with the fact that almost no vegetation is in sight: the view comprises the North-American west coast during the winter, and a large ocean area. Those examples suggest that the identification of vegetation is possible, as long as the physical properties of the atmosphere are known well enough to eliminate the contribution of the major atmospheric components in the spectral region of interest.

Of course, the changing cloud pattern, whose position is usually correlated with that of vegetation in some fashion, can interfere with our ability to correlate the VRE with vegetation. The cloud cover can vary on timescales as short as an hour. Clouds have characteristic spectral signatures that depend on their nature and altitude, and can certainly affect the VRE slope. The case of the night of 12 October 2009 is a case in point, as it is representative of the ambiguity of interpretation. During that night, the VRE slope increased almost linearly with time. This rise might have been caused by the rotation of the Earth which allowed an increasing fraction of the cloud-free Amazonian forest to contribute to the spectrum. A quantitative analysis using the image of the cloud cover would help to determine how good the correlation is, but is quite challenging. At the beginning of the same night, an initial negative value of the VRE, not usually reported in the literature, could well suggest that our correction of the contributions of scattering and of the ozone band is inadequate for the first two spectra.

2.4. Discussion

When compared to published values, the values of VRE obtained here are on the high side, even taking the internal error bars into account. Thus, in the review of Arnold (2008), as well as in more recent theoretical work like Arnold *et al.* (2009), the values of the VRE mentioned cover the range 0-12%. In our mind, the impossibility to find a satisfactory fit to correct the spectra of three of the eight nights suggests that vegetation may not be the only source contributing to the spectral region where the VRE is measured. The contribution of oceans, with their steep decrease in reflectivity up to about 520 nm (Tinetti *et al.* 2006b), could be non negligible. The Rayleigh-aerosol fit would then be overestimated, leading to an incorrect VRE. Surface features like deserts, as well as some clouds like stratocumuli present at low altitude, were also not considered here and could have the direct effect of increasing the VRE, since their spectra also show an increase in reflectivity around 700 nm (Tinetti *et al.* 2006a; Tinetti *et al.* 2006b; Arnold *et al.* 2009). The possible contribution of ocean phytoplankton, believed to be very low because water and particles in suspension are thought to absorb efficiently its emission, could also play a role, in particular in the cases where large areas of ocean are in sight.

In any case, the difficulty in disentangling the influence of various surface and atmospheric contributions, in a case where we know the expected location of the VRE and where we have surface and atmospheric data to guide us, provides a sobering reminder of the difficulties that might be present in our attempts to detect an analogous feature in the spectrum of an exoplanet.

2.5. Conclusion

We presented optical spectra of the Earth obtained over a period of 16 months with ES observations. In addition to atmospheric biomarkers such as oxygen, ozone, and water identified in previous studies, the signature of singly ionized calcium, previously detected in the transmission spectrum of the Earth, was found in our spectra. The measurement of the intensity of the VRE required correction of the Rayleigh and aerosol scattering, as well as the ozone Chappuis bands, all of which implied some knowledge of the atmospheric content of the planet. Once these corrections were made, the VRE was found to vary between $-5 \pm 5 \%$ and $15 \pm 5 \%$ (internal errors), and showed a good correlation with the vegetation-covered areas in the portion of the Earth's disk contributing to Earthshine. We note that our values of the VRE are somewhat higher than those found in previous studies.

In a manner analogous to what could be done with the long-term study of an exoplanet, this year-long survey allowed the study of the Earth's spectrum as a function of the phase. However, following rigorously the evolution from month to month is complicated by the fact that several effects are likely to contribute to the Earthshine changes during the year. The use of observatories located on opposite sides of the Earth and observing simultaneously could improve this. The atmosphere through which the observations are made is a significant source of problems that will not be present when observing an exoplanet from a space-based instrument. There is thus an undeniable interest in long-term study of the Earth with a space-based instrument, such as the one undertaken by the *Venus Express* team. The extension to other wavelength bands would also be of interest, since many additional biosignatures are present in other portions of the spectrum, such as the near infrared and the thermal infrared regions. In addition, theoretical modeling of the ES along the lines developed by Woolf *et al.* (2002), Turnbull *et*

al. (2006) and Montañés-Rodríguez *et al.* (2006) might help disentangle the various contributions to the observed ES temporal variations.

Acknowledgments

M.-E.N. acknowledges the continuing support of the NSERC Canada. The authors are grateful to Étienne Artigau for his help with data processing.

Disclosure

No competing financial interest exists.

Abbreviations

CCD, charge-coupled device; ER, Earth reflection; ES, Earthshine; IDL, Interactive Data Language; IRAF, Image Reduction and Analysis Facility; MS, Moonshine; NDVI, Normalized Difference Vegetation Index; VRE, Vegetation Red Edge; S/N, signal-to-noise ratio; TPF-C, TPF-O, TPF-I, Terrestrial Planet Finder, coronagraph, occulter, interferometer; UT, Universal Time.

2.6 References

- Arcichovsky VM. (1912) Auf der Suche nach Chlorophyll auf den Planeten. *Annales de l'Institut Polytechnique Don Cesarevitch Alexis a Novotcherkassk* 17:195-214.
- Arnold L. (2008) Earthshine Observation of Vegetation and Implication for Life Detection on Other Planets. A Review of 2001-2006 Works. *Space Science Reviews* 135:323-333.
- Arnold L, Bréon F-M, and Brewer S. (2009) The Earth as an extrasolar planet: the vegetation spectral signature today and during the last Quaternary climatic extrema. *International Journal of Astrobiology* 8:81-94.
- Arnold L, Gillet S, Lardièrè O, Riaud P, and Schneider J. (2002) A test for the search for life on extrasolar planets - Looking for the terrestrial vegetation signature in the Earthshine spectrum. *Astronomy and Astrophysics* 392:231-237.
- Brack A, Horneck G, Cockell CS, Bércecs A, Belisheva NK, Eiroa C, Henning T, Herbst T, Kaltenecker L, Léger A and others. (2010) Origin and Evolution of Life on Terrestrial Planets. *Astrobiology* 10:69-76.
- Christensen PR, and Pearl JC. (1997) Initial data from the Mars Global Surveyor thermal emission spectrometer experiment: Observations of the Earth. *Journal of Geophysical Research* 102:10875-10880.
- Des Marais DJ, Harwit MO, Jucks KW, Kasting JF, Lin DNC, Lunine JJ, Schneider J, Seager S, Traub WA, and Woolf NJ. (2002) Remote Sensing of Planetary Properties and Biosignatures on Extrasolar Terrestrial Planets. *Astrobiology* 2:153-181.
- Europe European Space Agency. (2003) Mars Express Analyses the Earth. Available online at

<http://sci.esa.int/science/www/object/index.cfm?fobjectid=33514&fbodylongid=1283>

European Space Agency. (2008) Venus Express searching for life – on Earth. Available online at

http://www.esa.int/esaCP/SEMUOW4N0MF_index_0.html

Hamdani S, Arnold L, Foellmi C, Berthier J, Billeres M, Briot D, François P, Riaud P, and Schneider J. (2006) Biomarkers in disk-averaged near-UV to near-IR Earth spectra using Earthshine observations. *Astronomy and Astrophysics* 460:617-624.

Kiang NY, Siefert J, Govindjee, and Blankenship RE. (2007) Spectral Signatures of Photosynthesis. I. Review of Earth Organisms. *Astrobiology* 7:222-251.

Kilston SD, Drummond RR, and Sagan C. (1966) A search for life on Earth at kilometer resolution. *Icarus* 5:79-98.

Korokhin VV, Velikodsky YI, Shkuratov YG, and Mall U. (2007) The phase dependence of brightness and color of the lunar surface: a study based on integral photometric data. *Solar System Research* 41:19-27.

Lane AP, and Irvine WM. (1973) Monochromatic phase curves and albedos for the lunar disk. *The Astronomical Journal* 78:267-277.

Leger A, Pirre M, and Marceau FJ. (1994) Relevance of oxygen and ozone detections in the search for primitive life in extra solar planets. *Advances in Space Research* 14:117.

Léna P, Lebrun F, and Mignard F. (1996) Astrophysique, méthodes physiques de l'observation. InterEditions et CNRS, Paris.

Montañés-Rodríguez P, Pallé E, Goode PR, Hickey J, and Koonin SE. (2005) Globally Integrated Measurements of the Earth's Visible Spectral Albedo. *The Astrophysical Journal* 629:1175-1182.

Montañés-Rodríguez P, Pallé E, Goode PR, and Martín-Torres FJ. (2006) Vegetation Signature in the Observed Globally Integrated Spectrum of

- Earth Considering Simultaneous Cloud Data: Applications for Extrasolar Planets. *The Astrophysical Journal* 651:544-552.
- Owen T. (1980) The Search for Early Forms of Life in Other Planetary Systems - Future Possibilities Afforded by Spectroscopic Techniques. Strategies for the Search for Life in the Universe. p.177.
- Pallé E, Osorio MRZ, Barrena R, Montañés-Rodríguez P, and Martín EL. (2009) Earth's transmission spectrum from lunar eclipse observations. *Nature* 459:814-816.
- Sagan C, Thompson WR, Carlson R, Gurnett D, and Hord C. (1993) A search for life on Earth from the Galileo spacecraft. *Nature* 365:715-721.
- Sagan C, and Wallace D. (1971) A search for life on Earth at 100 meter resolution. *Icarus* 15:515-554.
- Schneider J, Leger A, Fridlund M, White GJ, Eiroa C, Henning T, Herbst T, Lammer H, Liseau R, Paresce F and others. (2010) The far future of exoplanet direct characterization. *Astrobiology* 10:121-6.
- Seager S, and Ford EB. (2005) The vegetation red edge spectroscopic feature as a surface biomarker. In: *Space Telescope Science Institute symposium series. Astrophysics of Life*. Cambridge University Press, p.67-75.
- Seager S, Turner EL, Schafer J, and Ford EB. (2005) Vegetation's Red Edge: A Possible Spectroscopic Biosignature of Extraterrestrial Plants. *Astrobiology* 5:372-390.
- Selsis F, Léger A, and Ollivier M. (2005) Spectroscopic Signatures of Life on Exoplanets: The Darwin and TPF Missions. In: *Lectures in Astrobiology*, p.385-423.
- Slipher VM. (1924) Observations of Mars in 1924 Made at the Lowell Observatory: II. Spectrum Observations of Mars. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 36:261-262.

- Tinetti G, Meadows VS, Crisp D, Fong W, Fishbein E, Turnbull M, and Bibring J-P. (2006a) Detectability of Planetary Characteristics in Disk-Averaged Spectra. I: The Earth Model. *Astrobiology* 6:34-47.
- Tinetti G, Meadows VS, Crisp D, Kiang NY, Kahn BH, Fishbein E, Velusamy T, and Turnbull M. (2006b) Detectability of Planetary Characteristics in Disk-Averaged Spectra II: Synthetic Spectra and Light-Curves of Earth. *Astrobiology* 6:881-900.
- Turnbull MC, Traub WA, Jucks KW, Woolf NJ, Meyer MR, Gorlova N, Skrutskie MF, and Wilson JC. (2006) Spectrum of a Habitable World: Earthshine in the Near-Infrared. *The Astrophysical Journal* 644:551-559.
- Voigt S, Orphal J, Bogumil K, and Burrows J. (2001) The temperature dependence (203-293 K) of the absorption cross sections of O₃ in the 230-850 nm region measured by Fourier-transform spectroscopy. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 143:1-9.
- Woolf NJ, Smith PS, Traub WA, and Jucks KW. (2002) The Spectrum of Earthshine: A Pale Blue Dot Observed from the Ground. *The Astrophysical Journal* 574:430-433.

Table and figure captions

TAB. 2.1 - Summary of observations

TAB. 2.2 - Summary of VRE measurements for the spectra illustrated on Fig. 2.6

FIG. 2.2 - The average of the spectra taken on 19 May 2009, between 7:48UT and 8:17UT. The absorption lines of various molecules identified, as well as the position of the VRE.

FIG. 2.2 - Average of spectra taken between 23:40UT on 28 February 2009 and 01:30UT on 1 March 2009. The blue end of the spectrum shows calcium doublet lines H and K at 393.4 and 396.8 nm.

FIG. 2.3 - Average spectrum of 19 May 2009, median averaged to a spectral resolution of typical of the first generation space-based spectrograph like TPF-C ($\Delta\lambda = 10$ nm/pixel, $R=70$ at 700 nm).

FIG. 2.4 - Average spectra for 28 February/1 March 2009 (blue) and for 19 May 2009 (green), corrected for Rayleigh and aerosol scattering and ozone Chappuis band absorption. The dashed lines mark the two ranges that were used to compute the VRE. The portion of the Earth facing the Moon at the midpoint of each observation is displayed on the right (The Earth and Moon viewer was created by John Walker, and is available at <http://www.fourmilab.ch/earthview/custom.html>).

FIG. 2.5 - Median spectra obtained on each of the 8 nights of observation. The average phase of the Earth contributing to the spectra is also presented, but does not take into account the cloud cover at the time of each observation.

FIG.2.6 - The spectra of 5 nights corrected for ozone absorption and Rayleigh/aerosol scattering. The ranges used to compute the VRE are

indicated. The Earth as seen from the Moon at the midpoint of each observation is also shown with, projected on it, a map of the monthly averaged Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), an index similar to the VRE used in satellite monitoring of the Earth. It is defined as $NDVI = (f_I - f_R)/(f_I + f_R)$, where f_I and f_R are reflected fluxes in wide infrared and red filters. The data, obtained with the Terra/MODIS satellite and available at <http://neo.sci.gsfc.nasa.gov/Search.html?group=24>, were projected on a globe using Google Earth. The closest global cloud cover available is also shown, with times indicated in UT. They are composites of satellite data that are updated every 3 hours and are available at <http://www.ssec.wisc.edu/data/composites.html>. The globe projection is done by the Earth and Moon viewer.

Tables and figures

TAB. 2.1

Date	Moon phase angle (°)	Moon illumination (%)	UT ¹	Exposure time (s) ²	S/N ³	Final spectral resolution (nm/pix) ⁴
07/28/2008	-125°	23	7h32	180	75-105	0.6
			7h50	180		
			8h01	200		
			8h17	480		
02/28/2009/ 02/29-2009	130°	15	23h41	500	95-145	0.6
			00h05	700		
			00h25	500		
			00h42	650		
			1h10	1100		
04/29/2009	125°	20	01h36	500	60	1.0, 3.0
04/30/2009	112°	31	00h43	700	60	1.0, 3.0
05/19/2009	-114°	30	7h48	300	55-70	0.6
			7h57	300		
			8h07	400		
			8h17	400		

¹ UT listed in the table is the mid-value of the time between the first and the last spectra taken in a consecutive series of ES exposures combined together.

² Exposure time is the sum of the individual ES exposure times in a consecutive series of ES exposures.

³ S/N is the signal-to-noise ratio calculated in the 675-685nm region of the reduced spectra, before convolution.

⁴ When two values of resolution are listed, the first is the final spectral resolution for the region < 775 nm, and the second for the region > 775 nm, usually poorer because this second region is more affected by the residual fringes.

TAB. 2.1 - Continued

06/17/2009	-108°	36	7h05	400	40-50	1.0, 3.0
			7h25	400		
			7h45	600		
10/12/2009	-105°	40	9h26	100	20-30	1.0, 3.0
			9h31	200		
			9h39	200		
			9h48	300		
11/22/2009/ 11/23/2009	109°	32	22h03	350	20-25	1.0, 3.0
			22h19	625		
			22h40	850		
			23h02	725		
			23h23	750		
			23h42	725		
			00h03	700		
			00h18	350		

TAB. 2.2

Date	UT	VRE %
07/28/2008	7h32	10
	7h50	13
	8h01	10
	8h17	3
02/28/2009/	23h41	0
02/29-2009	00h05	0
	00h25	1
	00h42	1
	1h10	1
	01h26	1
05/19/2009	7h48	14
	7h57	12
	8h07	11
	8h17	9
06/17/2009	7h05	13
	7h25	14
	7h45	13
10/12/2009	9h26	-9
	9h31	-7
	9h39	2
	9h48	13

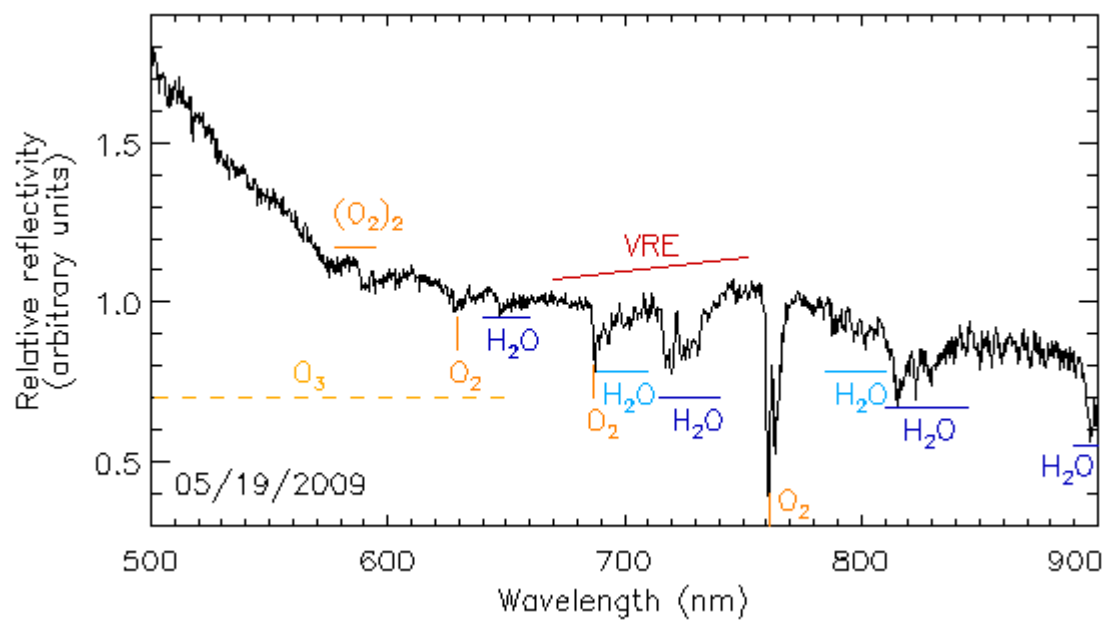


FIG. 2.1

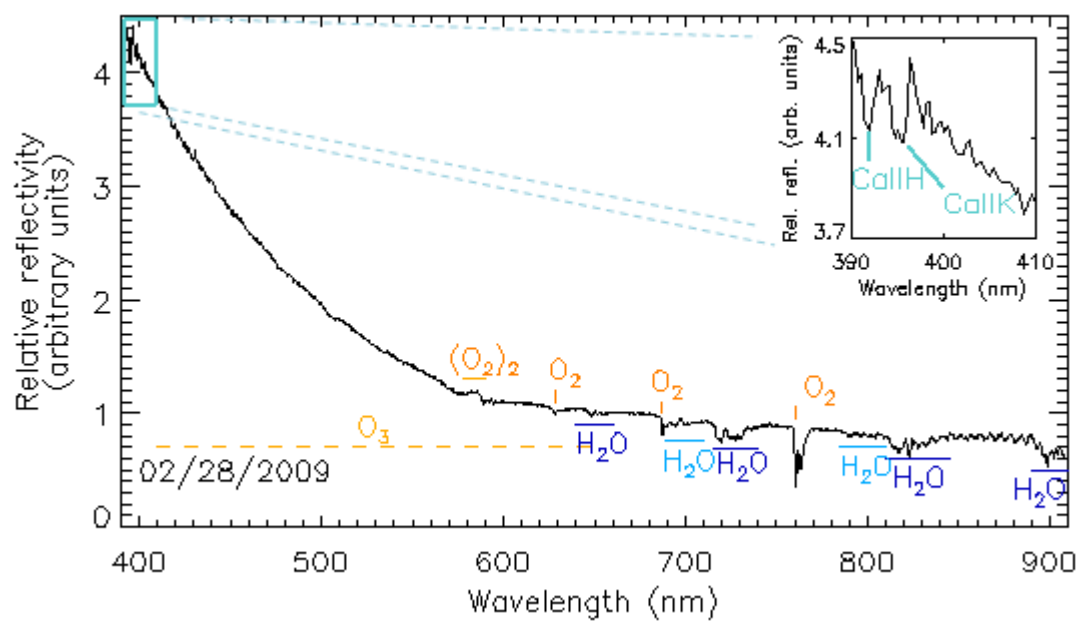


FIG. 2.2

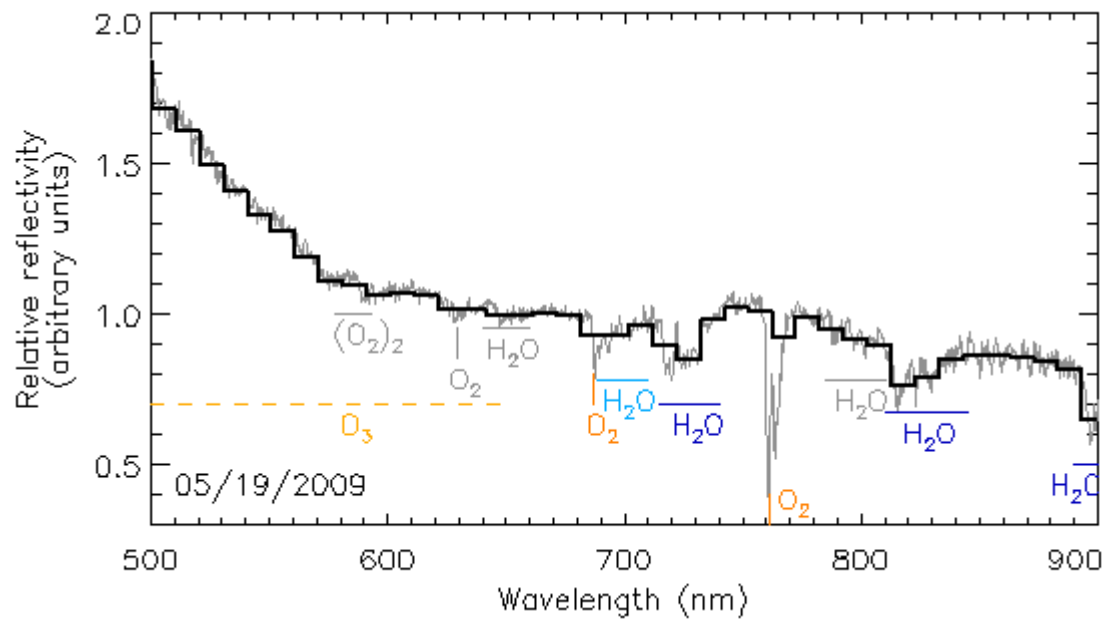


FIG. 2.3

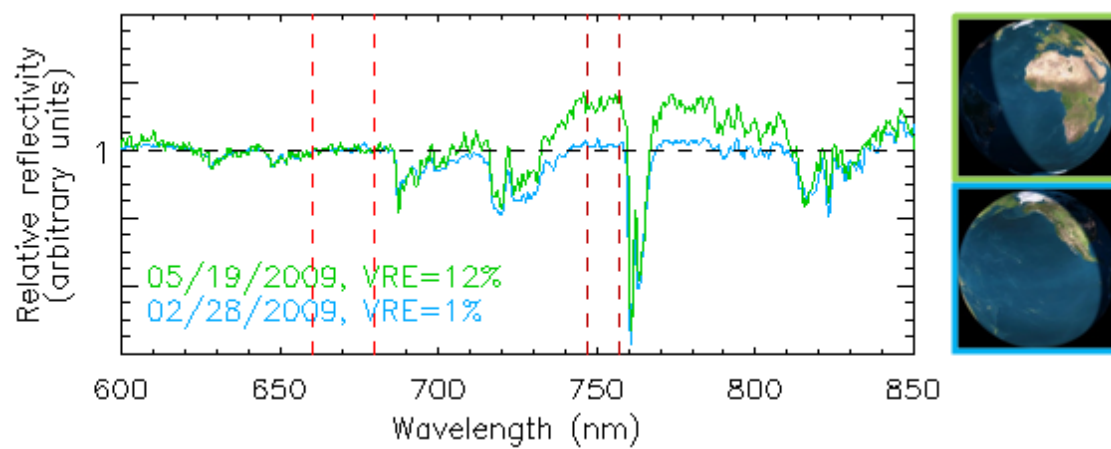


FIG. 2.4

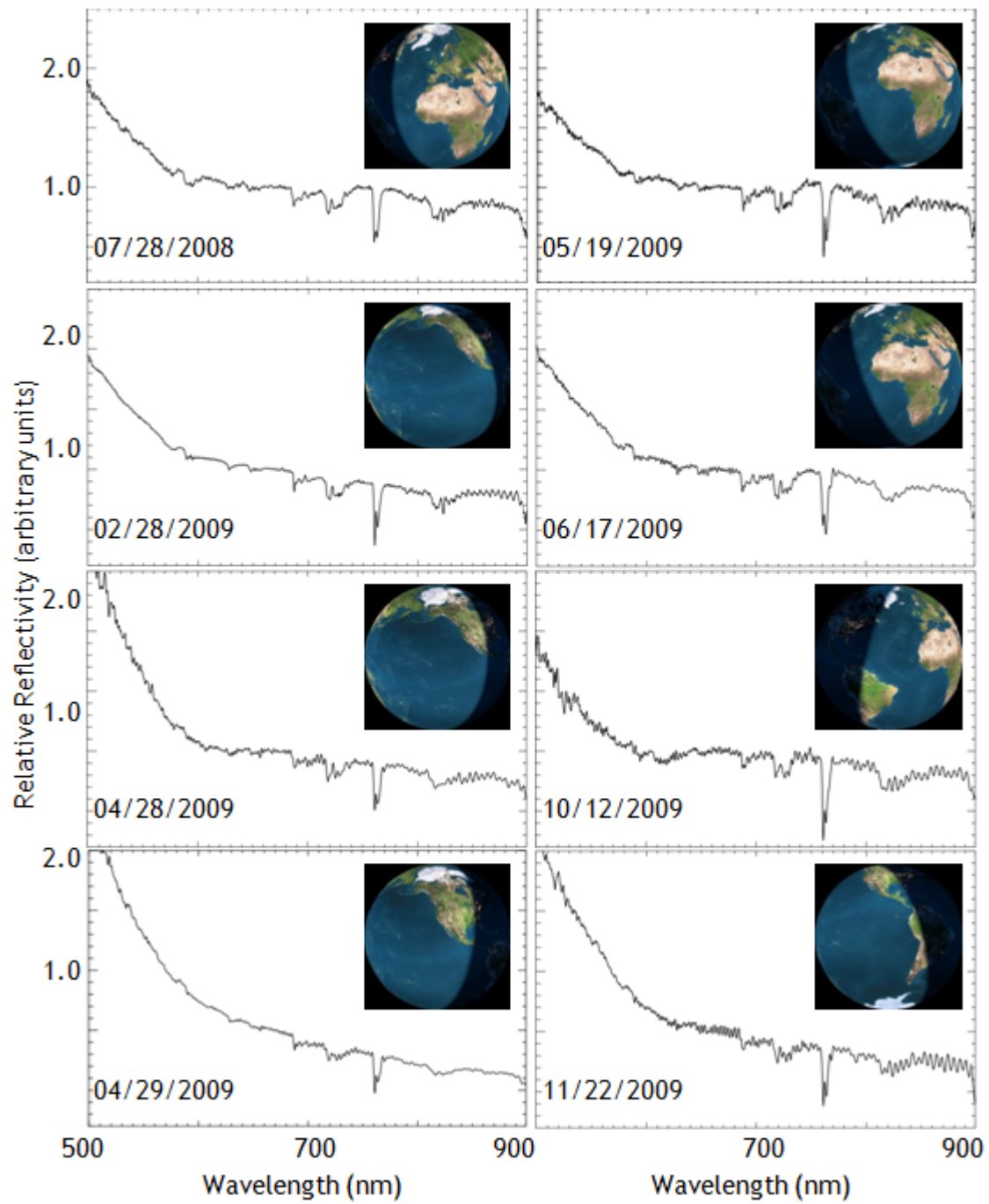


FIG. 2.5

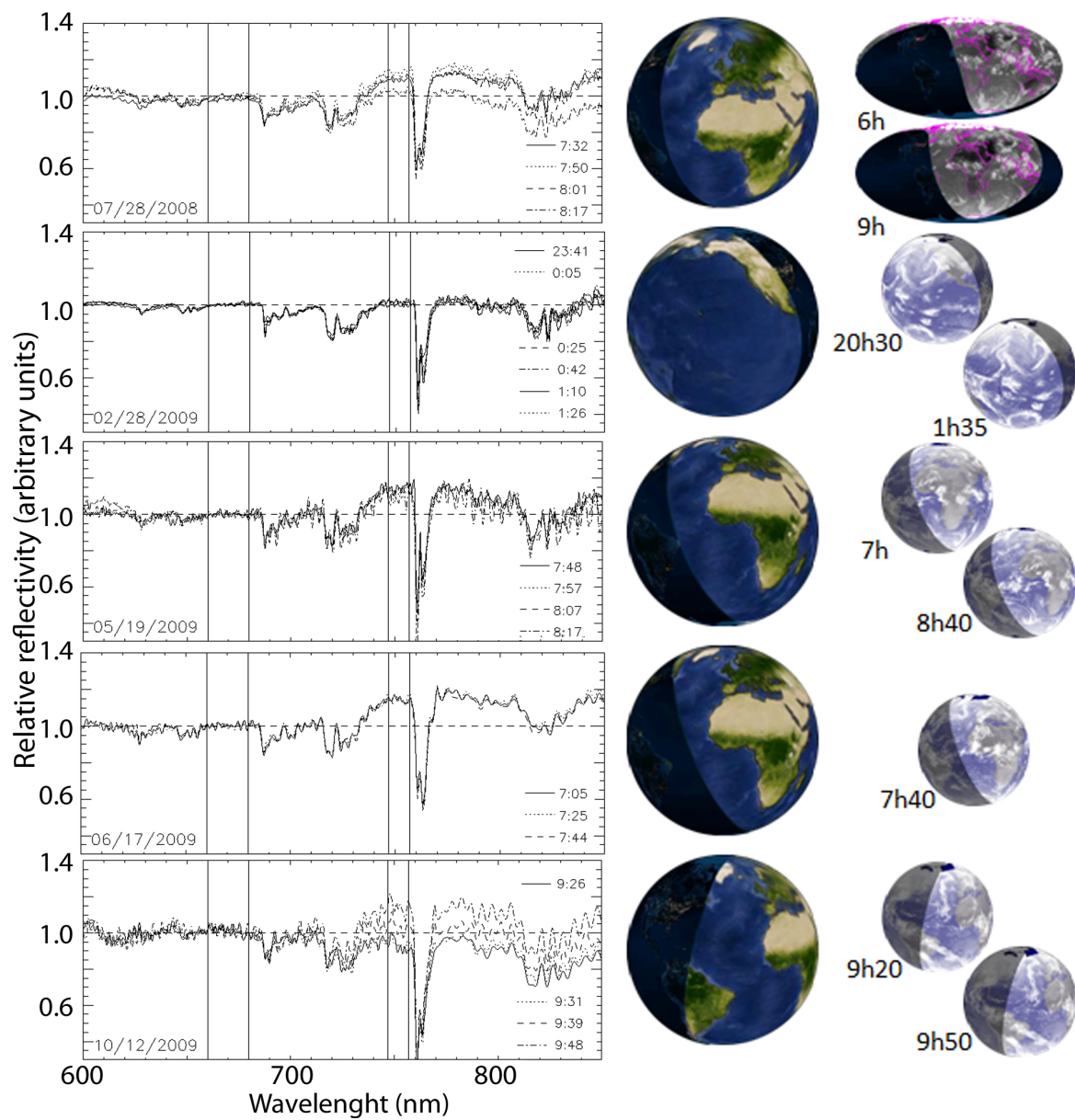


FIG. 2.6

Conclusion

Nous avons présenté des spectres de la Terre obtenus en lumière visible à l'OMM lors de huit nuits, entre juillet 2008 et novembre 2009, grâce à l'observation de la lumière cendrée de la Lune. Des biomarqueurs atmosphériques comme l'oxygène, l'ozone et l'eau ont été identifiés dans ces spectres, confirmant l'identification faite lors d'études précédentes. La signature du calcium ionisé une fois, observée précédemment dans le spectre de transmission de la Terre, a aussi été détectée. Nous avons aussi étudié la signature spectrale de la végétation, le *Vegetation Red Edge*. Sa mesure quantitative a nécessité l'élimination de la diffusion de Rayleigh et de la diffusion par les aérosols, ainsi que de la large bande de Chappuis de l'ozone. Cette mesure nécessite donc une certaine connaissance préalable de l'atmosphère. Une fois les corrections faites, la pente mesurée autour de 700 nm varie entre $-5 \pm 5\%$ et $15 \pm 5\%$ et les valeurs sont cohérentes avec la présence de végétation dans la portion du disque de la Terre qui contribue au spectre. Les valeurs s'étalent sur une plage plus large que celles trouvées dans des études précédentes. Cela pourrait s'expliquer par l'élimination incorrecte de l'atmosphère au dessus de l'observatoire, ou encore par le fait que certains éléments atmosphériques et de surface pourraient contribuer à la valeur ou influencer l'ajustement des différentes contributions retirées du spectre.

Les difficultés rencontrées pour détecter le VRE dans les spectres de la Terre suggèrent qu'une détection claire et non biaisée de la vie avec une signature de surface analogue, en supposant que le recours à un mécanisme semblable est répandu chez le vivant, est probablement à la limite de la portée des instruments de première génération tels que le TPF-C, dont la résolution sera très limitée. Même pour une planète semblable en tous points à la Terre, la signature du VRE pourrait être confondue ou tout simplement manquée si l'information sur les différents mécanismes à l'œuvre, dans l'atmosphère en particulier, n'était pas suffisante. Des images similaires à celles qui permettent l'interprétation des spectres de la Terre appartiennent malheureusement au futur lointain de l'étude des exoplanètes (Schneider *et al.* 2010). Il faut aussi considérer que la position spectrale d'une

signature analogue serait fort probablement à une longueur d'onde différente, selon l'étoile hôte et la transparence de l'atmosphère. Il devient alors difficile d'éviter les faux positifs créés par des signatures distinctives similaires comme des minéraux par exemple (Seager *et al.* 2005). Sur une note plus positive, il n'est pas à négliger qu'une combinaison optimiste de facteurs pourrait éventuellement mener à une signature plus marquée, et donc plus facile à détecter (Arnold 2008). Combiner la recherche d'une telle signature à celle d'autres biomarqueurs spectraux et étendre les observations dans le temps est sans doute le meilleur moyen d'avoir une évaluation juste de la possibilité de vie.

Dans le contexte de cette étude, nous avons évalué qualitativement l'influence des saisons sur le spectre de la Terre. Cependant, il est difficile de faire une étude rigoureuse de l'évaluation du spectre de mois en mois parce que la phase de la planète qui fait face à la Lune et que l'on peut observer grâce à la lumière cendrée est très différente selon le moment de l'année. Des observatoires situés à des points opposés sur Terre et faisant des observations simultanées permettraient d'améliorer la couverture. Toutefois, comme il a été montré ici, les observations au sol demeurent imprévisibles à cause des conditions météorologiques, ce qui limite la couverture temporelle. De plus, les observations faites au travers l'atmosphère doivent passer par des étapes de réduction supplémentaires qui augmentent beaucoup l'erreur, et qui ne seront pas présentes pour les télescopes spatiaux comme le TPF. Toutes ces raisons expliquent l'intérêt indéniable d'une étude à long terme de la Terre avec un spectrographe situé dans l'espace, comme celle entreprise par l'équipe de *Venus Express*. Aussi, il y a un intérêt à poursuivre l'étude faite ici dans d'autres domaines de longueur d'onde, en particulier le proche infrarouge et l'infrarouge thermique. Des données ont d'ailleurs été prises à l'OMM dans l'infrarouge proche, où il y a la possibilité de détecter d'autres biomarqueurs comme le méthane et le gaz carbonique.

Bibliographie

- Arcichovsky VM. (1912) Auf der Suche nach Chlorophyll auf den Planeten. *Annales de l'Institut Polytechnique Don Cesarevitch Alexis a Novotcherkassk* 17:195-214.
- Arnold L. (2008) Earthshine Observation of Vegetation and Implication for Life Detection on Other Planets. A Review of 2001-2006 Works. *Space Science Reviews* 135:323-333.
- Arnold L, Gillet S, Lardi re O, Riaud P, and Schneider J. (2002) A test for the search for life on extrasolar planets - Looking for the terrestrial vegetation signature in the Earthshine spectrum. *Astronomy and Astrophysics* 392:231-237.
- Baross J. (2007) The Limits of Organic Life in Planetary Systems. *Bulletin of the American Astronomical Society* 209:1070.
- Borucki WJ, Koch D, Basri G, Batalha N, Boss A, Brown TM, Caldwell D, Christensen-Dalsgaard J, Cochran WD, DeVore E and others. (2010) Characteristics of Kepler Planetary Candidates Based on the First Data Set: The Majority are Found to be Neptune-Size and Smaller. *The Astrophysical Journal* (submitted).
- Bracewell RN. (1978) Detecting nonsolar planets by spinning infrared interferometer. *Nature* 274:780.
- Brock TD, and Darland GK. (1970) Limits of Microbial Existence: Temperature and pH. *Science* 169:1316-1318.
- Butler RP, Marcy GW, Fischer DA, Brown TM, Contos AR, Korzennik SG, Nisenson P, and Noyes RW. (1999) Evidence for Multiple Companions to υ Andromedae. *The Astrophysical Journal* 526:916-927.
- Charbonneau D, Brown TM, Noyes RW, and Gilliland RL. (2002) Detection of an Extrasolar Planet Atmosphere. *The Astrophysical Journal* 568:377-384.
- Clark RN, Swayze GA, Wise R, Livo E, Hoefen T, Kokaly R, and Sutley SJ. (2007) USGS digital spectral library splib06a. US Geological Survey.
- Cocconi G, and Morrison P. (1959) Searching for Interstellar Communications. *Nature* 184:844-846.

- Crowe M. (1997) A history of the extraterrestrial life debate. Annual Conference of the Institute on Religion in an Age of Science (IRAS) Wiley, Hoboken, p.147-162.
- Des Marais DJ, Harwit MO, Jucks KW, Kasting JF, Lin DNC, Lunine JI, Schneider J, Seager S, Traub WA, and Woolf NJ. (2002) Remote Sensing of Planetary Properties and Biosignatures on Extrasolar Terrestrial Planets. *Astrobiology* 2:153-181.
- Duchêne G. (2010) Prospects for planet formation in multiple stellar systems. *Highlights of Astronomy* 15:764-765.
- Ford EB, Seager S, and Turner EL. (2001) Characterization of extrasolar terrestrial planets from diurnal photometric variability. *Nature* 412:885-887.
- Gates DM, Gates HJ, Gates JC, and Gates VR. (1965) Spectral properties of plants. *Applied Optics* 4:11-20.
- Gonzalez G, Brownlee D, and Ward P. (2001) The Galactic Habitable Zone: Galactic Chemical Evolution. *Icarus* 152:185-200.
- Grinspoon DH, Williams DM, Piccioni G, Bertaux J, and Moore C. (2008) Observing Earth from the Vantage Point of Venus Orbit. *Bulletin of the American Astronomical Society* 40:386.
- Haghighipour N, Niedzielski A, and Schneider J. (2010) The Stability and Prospects of the Detection of Terrestrial/Habitable Planets in Multiplanet and Multiple Star Systems. EAS Publications Series. p.365-373.
- Hamdani S, Arnold L, Foellmi C, Berthier J, Billeres M, Briot D, François P, Riaud P, and Schneider J. (2006) Biomarkers in disk-averaged near-UV to near-IR Earth spectra using Earthshine observations. *Astronomy and Astrophysics* 460:617-624.
- Henry GW, Marcy GW, Butler RP, and Vogt SS. (2000) A Transiting “51 Peg–like” Planet. *The Astrophysical Journal* 529:L41-L44.
- Hitchcock DR, and Lovelock JE. (1967) Life detection by atmospheric analysis. *Icarus* 7:149-159.
- Hollis WA. (1908) The Possibility of Life in Mars. *Nature* 77:438-439.
- Kalas P, Graham JR, Chiang E, Fitzgerald MP, Clampin M, Kite ES, Stapelfeldt K, Marois C, and Krist J. (2008) Optical Images of an Exosolar Planet 25 Light-Years from Earth. *Science* 322:1345-1348.

- Kaltenegger L. (2010) Characterizing Habitable Exomoons. *The Astrophysical Journal* 712:L125-L130.
- Kaltenegger L, Selsis F, Fridlund M, Lammer H, Beichman C, Danchi W, Eiroa C, Henning T, Herbst T, Léger A and others. (2010) Deciphering Spectral Fingerprints of Habitable Exoplanets. *Astrobiology* 10:89-102.
- Kaltenegger L, Traub WA, and Jucks KW. (2007) Spectral Evolution of an Earth-like Planet. *The Astrophysical Journal* 658:598-616.
- Kasting JF, Whitmire DP, and Reynolds RT. (1993) Habitable Zones around Main Sequence Stars. *Icarus* 101:108-128.
- Kerr RA. (2010) Recently discovered habitable world may not exist. *Science Now. AAAS*.
- Kiang NY, Segura A, Tinetti G, Govindjee, Blankenship RE, Cohen M, Siefert J, Crisp D, and Meadows VS. (2007a) Spectral Signatures of Photosynthesis. II. Coevolution with Other Stars And The Atmosphere on Extrasolar Worlds. *Astrobiology* 7:252-274.
- Kiang NY, Siefert J, Govindjee, and Blankenship RE. (2007b) Spectral Signatures of Photosynthesis. I. Review of Earth Organisms. *Astrobiology* 7:222-251.
- Kilston SD, Drummond RR, and Sagan C. (1966) A search for life on Earth at kilometer resolution. *Icarus* 5:79-98.
- Kipping DM, Fossey SJ, and Campanella G. (2009) On the detectability of habitable exomoons with Kepler-class photometry. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 400:398-405.
- Korokhin VV, Velikodsky YI, Shkuratov YG, and Mall U. (2007) The phase dependence of brightness and color of the lunar surface: a study based on integral photometric data. *Solar System Research* 41:19-27.
- Lafrenière D., Jayawardhana R., van Kerkwijk M. H. (2008) Direct Imaging and Spectroscopy of a Planetary-Mass Candidate Companion to a Young Solar Analog. *The Astrophysical Journal*, 689 : L153-L156.
- Lammer H, Bredehöft J, Coustenis A, Khodachenko M, Kaltenegger L, Grasset O, Prieur D, Raulin F, Ehrenfreund P, Yamauchi M and others. (2009) What makes a planet habitable? *Astronomy and Astrophysics Review* 17:181-249.

- Lane AP, and Irvine WM. (1973) Monochromatic phase curves and albedos for the lunar disk. *The Astronomical Journal* 78:267-277.
- Lineweaver CH, Fenner Y, and Gibson BK. (2004) The Galactic Habitable Zone and the Age Distribution of Complex Life in the Milky Way. *Science* 303:59-62.
- Lissauer JJ, and Stevenson DJ. (2007) Formation of Giant Planets. Protostars and Planets V. University of Arizona Press, p.591-606.
- Lovelock JE. (1975) Thermodynamics and the Recognition of Alien Biospheres. *Royal Society of London Proceedings Series B* 189:167-180.
- Marois C, Macintosh B, Barman T, Zuckerman B, Song I, Patience J, Lafreniere D, and Doyon R. (2008) Direct Imaging of Multiple Planets Orbiting the Star HR 8799. *Science* 322:1348-1352.
- Massey P. (1997) A User's Guide to CCD Reductions with IRAF. National Optical Astronomy Observatories, Tucson, Arizona, USA.
- Massey P, Valdes F, and Barnes J. (1997) A User's Guide to Reducing Slit Spectra with IRAF. National Optical Astronomy Observatories, Tucson, Arizona, USA.
- Mayor M, and Queloz D. (1995) A Jupiter-Mass Companion to a Solar-Type Star. *Nature* 378:355.
- Montañés Rodríguez P, Pallé E, Goode PR, Hickey J, and Koonin SE. (2005) Globally Integrated Measurements of the Earth's Visible Spectral Albedo. *The Astrophysical Journal* 629:1175-1182.
- Montañés Rodríguez P, Pallé E, Goode PR, and Martín-Torres FJ. (2006) Vegetation Signature in the Observed Globally Integrated Spectrum of Earth Considering Simultaneous Cloud Data: Applications for Extrasolar Planets. *The Astrophysical Journal* 651:544-552.
- Pallé E, Osorio MRZ, Barrena R, Montañés Rodríguez P, and Martín EL. (2009) Earth's transmission spectrum from lunar eclipse observations. *Nature* 459:814-816.
- Pearl JC, and Christensen PR. (1997) Mars Global Surveyor Thermal Emission Spectrometer: Observations of Earth. *Bulletin of the American Astronomical Society* 29:970.
- Pepe FA, and Lovis C. (2008) From HARPS to CODEX: exploring the limits of Doppler measurements. *Physica Scripta Volume T* 130:4007.

- Prantzos N. (2008) On the "Galactic Habitable Zone". *Space Science Reviews* 135:313-322.
- Qiu J, Goode PR, Pallé E, Yurchyshyn V, Hickey J, Montañés Rodríguez P, Chu MC, Kolbe E, Brown CT, and Koonin SE. (2003) Earthshine and the Earth's albedo: 1. Earthshine observations and measurements of the lunar phase function for accurate measurements of the Earth's Bond albedo. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)* 108:4709.
- Raulin-Cerceau F. (2005) Historical Review of the Origin of Life and Astrobiology. In: *Origins* edited by J Seckbachs, Springer, Netherlands, 15-33.
- Sagan C. (1994) *Pale blue dot : a vision of the human future in space*. Random House, New York.
- Sagan C, Thompson WR, Carlson R, Gurnett D, and Hord C. (1993) A search for life on Earth from the Galileo spacecraft. *Nature* 365:715-721.
- Sagan C, and Wallace D. (1971) A search for life on Earth at 100 meter resolution. *Icarus* 15:515-554.
- Schneider J, Léger A, Fridlund M, White GJ, Eiroa C, Henning T, Herbst T, Lammer H, Liseau R, Paresce F and others. (2010) The Far Future of Exoplanet Direct Characterization. *Astrobiology* 10:121-126.
- Schulze-Makuch D, and Irwin L. (2004) *Life in the universe: expectations and constraints*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, Germany.
- Seager S, and Ford EB. (2005) The vegetation red edge spectroscopic feature as a surface biomarker. In: *Space Telescope Science Institute symposium series. Astrophysics of Life*. Cambridge University Press, p.67-75.
- Seager S, Turner EL, Schafer J, and Ford EB. (2005) Vegetation's Red Edge: A Possible Spectroscopic Biosignature of Extraterrestrial Plants. *Astrobiology* 5:372-390.
- Selsis F, Kasting JF, Levrard B, Paillet J, Ribas I, and Delfosse X. (2007) Habitable planets around the star Gliese 581? *Astronomy and Astrophysics* 476:1373-1387.
- Selsis F, Léger A, and Ollivier M. (2005) Spectroscopic Signatures of Life on Exoplanets: The Darwin and TPF Missions. In: *Lectures in Astrobiology*, 385-423.

- Sterzik MF, Bagnulo S, Keane JV, Mumma MJ, Siefert JL, and Werthimer DJ. (2009) Search For Chiral Signatures in the Earthshine. *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*. p.371.
- Strand K. (1943) 61 Cygni as a Triple System. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 55:29-32.
- Struve O. (1952) Proposal for a project of high-precision stellar radial velocity work. *The Observatory* 72:199-200.
- Tikhov GA. (1914) Étude de la lumière cendrée de la lune au moyen des filtres sélecteurs. *Mitteilungen der Nikolai-Hauptsternwarte zu Pulkowo* 6:15.
- Tinetti G, Meadows VS, Crisp D, Fong W, Fishbein E, Turnbull M, and Bibring J-P. (2006a) Detectability of Planetary Characteristics in Disk-Averaged Spectra. I: The Earth Model. *Astrobiology* 6:34-47.
- Tinetti G, Meadows VS, Crisp D, Kiang NY, Kahn BH, Fishbein E, Velusamy T, and Turnbull M. (2006b) Detectability of Planetary Characteristics in Disk-Averaged Spectra II: Synthetic Spectra and Light-Curves of Earth. *Astrobiology* 6:881-900.
- Tinetti G, Vidal-Madjar A, Liang M-C, Beaulieu J-P, Yung Y, Carey S, Barber RJ, Tennyson J, Ribas I, Allard N and others. (2007) Water vapour in the atmosphere of a transiting extrasolar planet. *Nature* 448:169-171.
- Turnbull MC, Traub WA, Jucks KW, Woolf NJ, Meyer MR, Gorlova N, Skrutskie MF, and Wilson JC. (2006) Spectrum of a Habitable World: Earthshine in the Near-Infrared. *The Astrophysical Journal* 644:551-559.
- van de Kamp P. (1956) Planetary companions of stars. *Vistas in Astronomy* 2:1040-1048.
- van de Kamp P. (1963) Astrometric study of Barnard's star from plates taken with the 24-inch Sproul refractor. *The Astronomical Journal* 68:515-521.
- Vogt SS, Butler RP, Rivera EJ, Haghighipour N, Henry GW, and Williamson MH. (2010) The Lick-Carnegie Exoplanet Survey: A 3.1 M_{Earth} Planet in the Habitable Zone of the Nearby M3V Star Gliese 581. *The Astrophysical Journal* 723:954-965.
- von Bloh W, Bounama C, Cuntz M, and Franck S. (2007) The habitability of super-Earths in Gliese 581. *Astronomy and Astrophysics* 476:1365-1371.
- Walker JCG. (1977) *Evolution of the atmosphere*. Macmillan, New York.

- Ward PD, and Brownlee D. (2000) *Rare Earth: Why Complex Life is Uncommon in the Universe*. Springer/Copernicus, New York.
- Wolstencroft RD, Breon F-M, Aspin C, Davis C, and Fujiyoshi T. (2005) Polarization of Planet Earth and Model Earth-like Planets. *Astronomical Polarimetry: Current Status and Future Directions*. p.211.
- Wolstencroft RD, and Raven JA. (2002) Photosynthesis: Likelihood of Occurrence and Possibility of Detection on Earth-like Planets. *Icarus* 157:535-548.
- Wolszczan A, and Frail DA. (1992) A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12. *Nature* 355:145-147.
- Woolf NJ, Smith PS, Traub WA, and Jucks KW. (2002) The Spectrum of Earthshine: A Pale Blue Dot Observed from the Ground. *The Astrophysical Journal* 574:430-433.
- Wyszecki G, and Stiles W. (1982) *Color science: concepts and methods, quantitative data and formulae*. Wiley-Interscience, New York.

Annexe A: Détails techniques propres au projet

L'observation et la réduction de données spectroscopiques de la lumière cendrée de la Lune en vue d'en tirer des spectres de la Terre présentent de nombreuses différences avec l'observation plus conventionnelle d'étoile ou d'objets étendus lointains. Certains aspects de la collecte et du traitement de ces données, donc été développés spécifiquement pour le projet, font l'objet de cette annexe.

1 Observations

Toutes les observations ont été obtenues avec le spectrographe à fente longue (Perkin-Elmer, Modèle 31523) au foyer $f/8$ du télescope de 1,6 m de l'Observatoire du Mont-Mégantic (OMM) ($45^{\circ}27'18''N$ $71^{\circ}9'12''O$). Le réseau de 300 traits/mm a permis de couvrir toute la région spectrale comprise entre 350 et 950 nm avec une résolution spectrale d'environ 0.35 nm/pixel ($R = 2000$ à 700 nm). Les données ont été recueillies avec un CCD aminci de 2688x512 pixels STA0520A¹. Pendant une période d'observation, qui dure quelques heures ou moins, on place en alternance la fente du spectrographe (7' de long) à mi-chemin sur la transition lune-ciel du côté cendré et du côté du croissant brillant (Figure 1.2). Des poses de lampes de calibration néon et hélium-argon sont aussi prises entre les observations, afin d'assurer une calibration en longueur d'onde précise sur toute la plage spectrale.

Restrictions sur le moment d'observation

La lumière cendrée de la Lune est émise par le Soleil, réfléchi une première fois sur la Terre, et une seconde fois sur la surface non-éclairée de la Lune (Figure 1.2). Elle est beaucoup plus facile à observer lorsque l'autre portion du disque, le croissant éclairé

¹ Toutes les caractéristiques du télescope, du spectrographe et du CCD sont détaillées dans le Manuel d'opération, disponible en ligne à http://www.astro.umontreal.ca/omm/manuel_fr.html.

directement par le Soleil, est très mince. Cela est dû à un double effet : à ce moment, non seulement le croissant est moins éblouissant, mais en plus, la portion de Terre qui réfléchit la lumière est plus grande, puisque les phases de la Terre pour un observateur sur la Lune sont l'inverse des phases de la Lune pour un observateur sur la Terre. Il est impossible de faire des observations lors de la nouvelle lune, puisque le croissant clair doit aussi être observé pour enlever la contribution du spectre du Soleil et de la Lune. Les observations se font donc un peu avant la nouvelle lune, au dernier croissant ou encore un peu après, au premier croissant. Il y a donc théoriquement deux périodes par mois où les observations sont possibles, qui durent chacune quelques jours.

Cependant, étant donné la géométrie du système Soleil-Terre-Lune un peu avant et après la nouvelle lune, la Lune n'est visible qu'au début et à la fin de la nuit, respectivement. Or, plus le croissant de Lune est petit, plus le temps pour observer cette dernière est limité, puisqu'elle se couche de plus en plus tôt ou qu'elle se lève de plus en plus tard. La période d'observation est limitée par l'altitude de la Lune, qui doit être supérieure à 10 degrés pour être observable à l'OMM. Il y a donc un compromis à faire, puisque le croissant est le plus petit au moment où la période d'observation est la plus courte et la plus rapprochée de la clarté du jour. Pendant la période d'observation comprise entre juillet 2008 et novembre 2009, il y a eu des mois où la période idéale était trop courte ou simplement inexistante, la Lune était alors accessible pendant moins de 45 minutes avant le lever ou après le coucher du Soleil. Heureusement, sauf quelques exceptions, presque toutes les périodes où la lumière cendrée de la Lune était observable à l'OMM ont été accordées pour le projet (voir le calendrier des observations à la Figure A.1).

Brillance de la Lune

Deux des difficultés rencontrées lors de ce projet sont liées à la nature même de la Lune, un objet astronomique très rapproché et très lumineux qui est rarement observé avec un télescope de la dimension de celui de l'OMM. Dès les premières observations, nous avons réalisé qu'étant donné la taille du miroir (1.6m de diamètre) du télescope, même en ajustant l'obturateur au plus court temps d'exposition et la fente du spectrographe à sa largeur minimale de $150\mu\text{m}/2.4''$, il était impossible d'observer le croissant clair sans saturer le

détecteur CCD. Après quelques tests, il a été décidé que les observations seraient faites avec trois des quatre panneaux du miroir primaire fermés, ce qui réduit la surface collectrice au $\frac{1}{4}$ de son aire totale, et permet de faire les poses de lumière du croissant en 1-2 secondes. Afin d'éviter les manipulations, le miroir reste dans cet état aussi lors des observations de la lumière cendrée, qui se font alors dans un temps raisonnable de quelques centaines de secondes. Cette astuce permet, bien que le miroir soit techniquement trop grand, d'obtenir les données spectroscopiques essentielles au projet.

Pointage de la Lune

Une autre difficulté a été de pointer la Lune et de la suivre puisque son déplacement sur le ciel n'est pas exactement compensé par l'entraînement sidéral du télescope. Le télescope de l'OMM ne possède pas de guidage spécialement conçu pour la Lune. Or, son déplacement est tel qu'on ne peut se passer d'un pointage adapté; des effets notables sont visibles à l'intérieur d'une même pose de lumière cendrée. De plus, un pointage précis était nécessaire pour passer efficacement du côté cendré de la Lune au côté clair. Une partie de la solution a été d'utiliser le logiciel de cartographie stellaire *Starry Night*² et de concevoir un programme pour calculer le guidage précis à appliquer à partir des positions de la Lune au cours de la nuit.

Lorsque les conditions météorologiques à l'observatoire n'étaient pas idéales (ciel nuageux), la transition entre la lune et le ciel était plus faible du côté cendré, et devenait difficile à repérer avec la caméra de pointage, même avec un guidage adapté. Avec l'expérience, les techniciens ont mis au point un système de déplacement du télescope par *offset* automatique entre le côté clair et le côté cendré. Ce système a permis lors des dernières nuits de faire des observations beaucoup plus efficaces.

Bilan

Il a été possible d'obtenir des données lors de 10 nuits d'observation couvrant une période de 16 mois entre juillet 2008 et novembre 2009 (Figure A.1). Les séances qui ont donné de

² <http://www.starrynight.com/>

bons résultats sont indiquées en orange foncés. Quatre nuits ont permis d'observer avant la nouvelle lune (avec l'Afrique en vue) : en juillet 2008, mai, juin et octobre 2009, tandis que six nuits ont permis des observations après la nouvelle lune, avec l'océan Pacifique en vue : en février, mars, avril et novembre 2009. Les spectres de 2 des nuits ont été réduites jusqu'au bout mais pas utilisés dans le présent mémoire. Le pourcentage de nuits claires (14/45) obtenues se situe dans la moyenne de l'OMM, soit environ 33%.

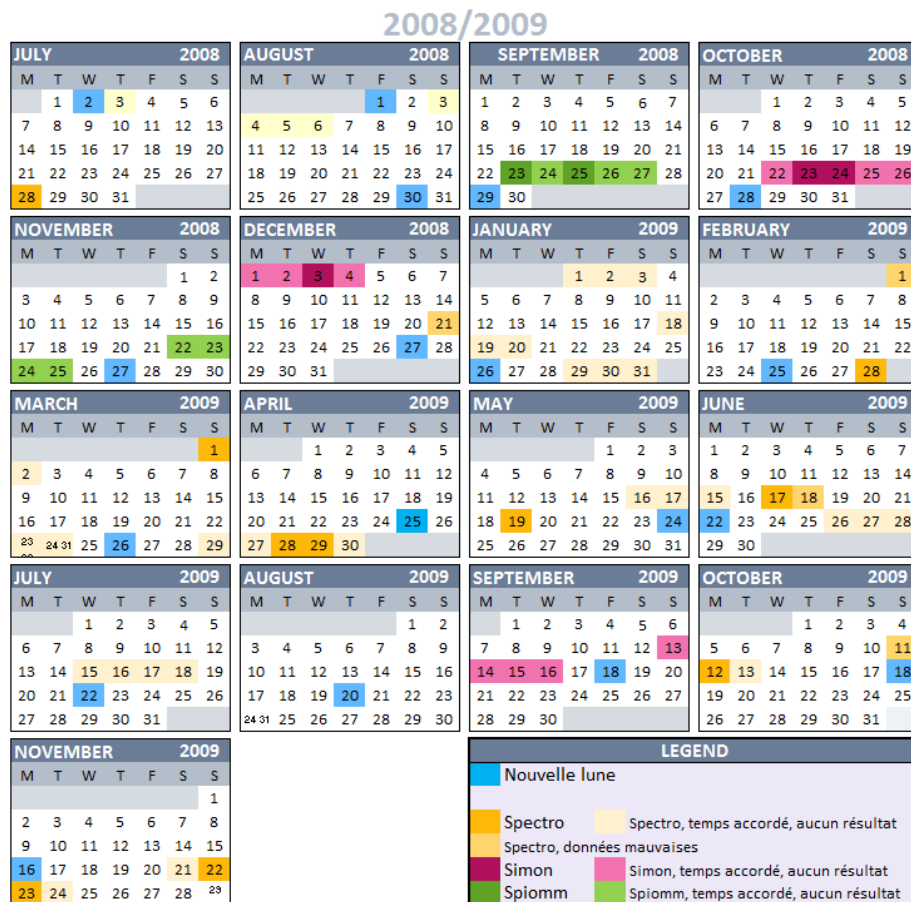


FIG. A. 1 - Calendrier des séances d'observation. Le jour de la nouvelle lune est indiqué en bleu. Les 10 nuits pour lesquelles les données de spectroscopie visible ont été réduites sont indiquées en orange foncé. Suite à la réduction, les données du 1 mars 2009 et du 23 novembre 2009 ont été écartés du présent mémoire étant donné leur piètre qualité.

2 Réduction des données

Une méthode de réduction propre à ce projet a été développée. Elle permet d'éliminer les imperfections provenant du montage expérimental (téléscope, spectrographe, détecteur), et d'obtenir des spectres de la Terre calibrés à partir des images brutes des spectres de la lumière cendrée de la Lune et du croissant clair de la Lune. Elle se base en grande partie sur la méthode employée par d'autres groupes qui ont étudié la lumière cendrée (Arnold *et al.* 2002; Hamdani *et al.* 2006; Montañés Rodríguez *et al.* 2005; Montañés Rodríguez *et al.* 2006; Turnbull *et al.* 2006; Woolf *et al.* 2002) ainsi que sur la méthode traditionnelle employée pour traiter les spectres stellaires (Massey 1997; Massey *et al.* 1997).

2.1 Données brutes

Les données provenant du CCD sont des images de 2688x512 pixels. Le grand axe horizontal correspond à la dispersion spectrale tandis que le petit axe vertical est celui de la dispersion spatiale. La Figure A.2 montre les données brutes d'une pose de Lune cendrée (ES) et une de Lune brillante (MS). En plus des spectres de lunes cendrées et des spectres du croissant clair, il y a quatre types d'images de calibration, les lampes au néon et à l'hélium-argon, les plages uniformes PU « flats » et les plages de piédestal PP « bias »).

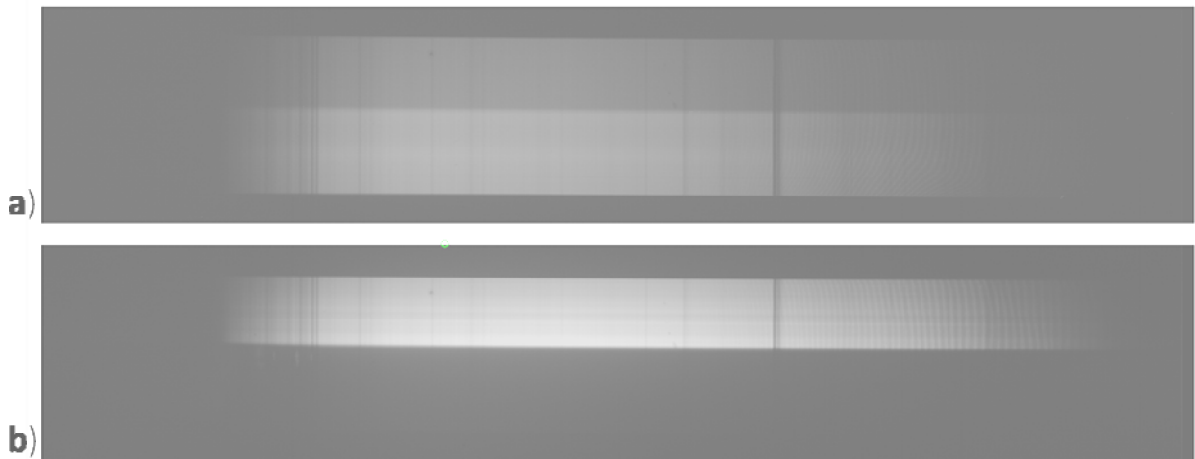


FIG. A.2 - Données brutes de a) une pose de Lune cendrée, les lignes supérieures sont les spectres du ciel et les lignes inférieures les spectres de Lune, et b) une pose du croissant de

Lune, les lignes supérieures sont les spectres de Lune, et les inférieures, celles du ciel adjacent.

Remarque : Franges d'interférence

Les données montrent un patron de franges d'interférence qui se superpose aux spectres dans la portion rouge, où sont dispersées les longueurs d'onde plus grandes qu'environ 630nm. Ces franges, typiquement d'une amplitude d'une dizaine de pourcents du flux qui varie selon la longueur d'onde et d'une période de 10-20 pixels, rendent très difficile le traitement des données. Le principal problème est que le patron de franges est semblable mais pas identique pour les images prises au cours de la même soirée. Il a donc fallu élaborer une solution pour éliminer ces franges et apporter certaines modifications à la réduction standard.

2.2 Logiciels de réduction

Deux logiciels ont été utilisés pour faire la réduction des données. Le logiciel IRAF³, grâce à ses tâches préprogrammées, a permis une première réduction rapide qui a confirmé la qualité des données. Cependant, étant donné la quantité et la nature des données à réduire, IDL⁴, un logiciel plus flexible, a été utilisé pour élaborer un programme de réduction dédié. Ce dernier est constitué d'une procédure centrale écrite en langage IDL qui contient l'enchaînement des étapes nécessaire à la réduction d'un ensemble de données. Cette procédure appelle d'autres procédures ou fonctions IDL ainsi que certaines tâches d'IRAF qu'il n'aurait pas été pertinent de reprogrammer. Afin d'utiliser ce programme de réduction, les images brutes au format « fits » de chaque nuit sont d'abord regroupées dans un dossier. Les poses saturées, abîmées ou indésirables sont retirées et les noms des fichiers restants sont uniformisés.

2.3 Étapes de réduction

Étape 0 - Les informations spécifiques à la nuit considérée sont entrées

³ *Image Reduction and Analysis Facility*, <http://iraf.noao.edu/>

⁴ *Interactive Data Language*, <http://www.itvis.com/ProductServices/IDL.aspx>

Les données propres à chaque nuit, ainsi que les données communes et les paramètres de réduction et options du programme, consignées dans des fonctions IDL, sont appelées dans la procédure principale.

Étape 1 - Lecture et inspection des images brutes

Les noms des images brutes de la nuit sont ensuite générés et toutes les poses de même type sont lues dans des cube de données: les plages de mesure du piédestal ou *bias* (PP), les plages uniformes ou *flat* (PU), les plages de la lumière cendrée (ES), celles du croissant de lune (MS), et finalement les plages de lampes.

Il est alors possible d'extraire les informations de chaque pose dans l'entête de l'image et de représenter les données de différentes manières, pour s'assurer qu'elles ne comportent pas de défauts majeurs et pour déterminer la zone utile sur le CCD que l'on veut conserver. L'affichage d'une moyenne des « lignes » du CCD (axe de dispersion spectrale) des images scientifiques avec celles des lampes permet d'estimer la calibration en longueur d'onde et de déterminer les colonnes à éliminer de chaque côté. Étant donné que la plage finale visée est de 400-900 nm, on conserve ici la zone qui va de la raie d'hélium à 389 nm à la raie d'argon à 922 nm. L'affichage d'une moyenne des « colonnes » du CCD (axe spatial) des images scientifiques et des PU permet d'évaluer l'uniformité de l'illumination des images ainsi que de déterminer la zone qui contient le ciel, celle qui contient la lune ainsi que la zone de transition et les lignes non éclairées à ignorer des images scientifiques.

Étape 2 – Fabrication de la PP médiane

Les 9 plages de piédestal (PP) de chaque nuit sont combinées⁵. On obtient ainsi une image pour laquelle chaque pixel est la médiane des valeurs de ce pixel pour les 9 PP initiales.

Étape 3 - Soustraction de la PP et des rayures verticales des images

Une sous-procédure permet d'abord de soustraire la PP médiane des images scientifiques, PU et des lampes. Normalement, les colonnes de surlecture du détecteur (*overscan*), sont

⁵ <http://star.pst.qub.ac.uk/idl/MEDIAN.html>

utilisées pour éliminer la variabilité ponctuelle du contrôleur électronique du détecteur. Pour chaque image, y compris le PP médian, la courbe du flux moyen de ces colonnes par rapport à l'axe spatial est obtenue et soustraite. Cette stratégie n'a pas été utilisée ici, puisqu'il a été déterminé que la courbe était semblable pour toutes les plages. Cette courbe moyenne n'a donc pas été soustraite de la PP et de toutes les plages séparément; la réponse est éliminée des images scientifiques lors de la soustraction de la PP.

Une différence de réponse des colonnes du détecteur crée un patron de rayures verticales qui se superpose aux spectres. Les lignes de CCD qui n'ont pas été éclairées (en haut et en bas des lignes de spectres) et qui devraient théoriquement être nulles sont utilisées pour éliminer ce patron. Pour chaque colonne de chaque image, un ajustement linéaire des lignes non exposées est soustrait de la zone éclairée, ce qui permet d'éliminer partiellement ce défaut.

Normalement, à ce point, les images sont coupées pour ne conserver que les colonnes et lignes voulues. Cependant, il est préférable de conserver quelques pixels aux extrémités afin de normaliser plus facilement la PU médiane. Les pixels inutiles ou problématiques sont mis à zéro.

Étape 4 - Fabrication de la PU médiane et normalisée

Les 9 plages uniformes (PU) sont combinées en une seule PU médiane, qui est ensuite normalisée. Un spectre moyen est extrait en faisant la moyenne des lignes centrales. Les variations fines du spectre sont éliminées en divisant le spectre en 10 à 30 sections contenant le même nombre de colonnes et en les remplaçant par la médiane des pixels de la section. Une spline cubique est ensuite ajustée à cette fonction⁶. En divisant chacune des lignes de la PU par cette spline, on obtient une image dont le flux moyen est 1. Les grandes structures sont éliminées, il ne reste que les petites variations de réponse du détecteur et les franges d'interférences. À cause des franges d'interférences, la procédure décrite ci-haut est accomplie indépendamment pour la partie bleue du spectre ($\lambda < 630\text{nm}$) et la partie rouge,

⁶ <http://star.pst.qub.ac.uk/idl/SPLINE.html>

ce qui permet de bien ajuster les grandes structures de la portion bleue de la plage spectrale, ce qui est souhaité, sans aussi ajuster les franges du côté rouge. Les deux ajustements couvrent une portion centrale commune pour éviter une discontinuité.

Après cette étape, les images peuvent être coupées. Pour faire une partie de la réduction en commun, toutes les images sont coupées à la même taille. Puisque les angles des réseaux et n'étaient pas les mêmes pour toutes les dates, la dispersion spectrale n'était pas la même non plus. On choisit donc une zone commune, qui ne correspond pas nécessairement pour chaque image à la zone idéale, comprise entre 390 et 910 nm. Les pixels de la portion commune qui est inutile à une date donnée sont donc identifiés à NaN (*not a number*).

Étape 5 - Identification automatique et manuelle des mauvais pixels et rayons cosmiques

Une sous-procédure permet de détecter automatiquement les mauvais pixels (défauts du détecteur, poussière, etc.). Pour ce faire, on utilise la PU normalisée. Sur cette plage on identifie les pixels dont les valeurs s'écartent de plus de 3 sigmas de leurs voisins. Les tests ont montré qu'il est préférable de répéter cette procédure trois fois en rétrécissant successivement le voisinage des pixels d'une boîte de 30x30 pixels au début à une boîte de 10x10 pixels à la fin. Dans l'image masque finale des mauvais pixels, on assigne une valeur NaN aux mauvais pixels et 1 à tous les autres

La procédure automatique n'identifie pas tous les mauvais pixels. En particulier, la grande majorité des mauvais pixels dans la zone où se trouvent les franges ne sont pas repérés, puisque ces dernières rendent le processus inefficace. Les zones de mauvais pixels restantes sont donc identifiées à la main sur la PU normalisée avec l'outil *region* du programme SAO image ds9⁷. Une sous-procédure permet de créer une deuxième carte de mauvais pixels avec ces nouvelles régions. La carte globale est créée par la multiplication des deux cartes.

⁷ <http://hea-www.harvard.edu/RD/ds9/>

Pour les plages de lumière cendrées, qui contiennent moins de flux, des cartes individuelles sont aussi créées à la main avec ds9 afin d'identifier toutes les uniformités restantes, principalement des rayons cosmiques. Une carte propre à chaque image est constituée en multipliant la carte individuelle à la carte globale. Pour finir, toutes les images sont multipliées par leur carte respective, si elle existe, ou par la carte globale. Les mauvais pixels sont identifiés mais pas corrigés. Ils sont tout simplement ignorés pour le reste de la réduction.

Étape 6 – Réalignement des images

Un mauvais ajustement de l'angle de la fente du spectrographe provoque un mauvais alignement des raies spectrales avec les colonnes du détecteur, et donc, de l'axe de dispersion avec les lignes. Ce désalignement doit être corrigé pour éviter une mauvaise correspondance des raies spectrales ou leur étalement quand les lignes des ES et des MS sont combinées et quand les spectres ES sont divisés par les spectres MS.

Pour faire l'alignement, on a utilisé les lampes de calibration hélium-argon et néon qui ont été prises après chaque séquence ES-MS. Ces poses sont réduites individuellement jusqu'à cette étape. Normalement, les deux lampes produisent des spectres stables au cours de la nuit, mais si un décalage est présent, les deux portions doivent être réduites séparément. Les lampes d'hélium-argon et les lampes néon sont combinées entre elle et les deux poses médianes résultantes sont moyennées. À ce point, on utilise le groupe de fonctions `noao.twodspec.longslit` d'IRAF. On calibre d'abord un spectre constitué de la moyenne une dizaine de lignes au milieu de l'image⁸. La position de quelques raies connues est identifiée à la main en utilisant le catalogue des lampes d'étalonnage⁹. La fonction identifie ensuite automatiquement plusieurs autres raies à partir d'une banque de données des raies d'hélium, d'argon et de néon. Un ajustement linéaire des ~30 couples ainsi identifiés de longueur d'onde en fonction de la position constitue la fonction de dispersion. Une fonction du même groupe IRAF¹⁰ permet d'identifier cette trentaine de

⁸ <http://iraf.noao.edu/scripts/irafhelp?identify>

⁹ Disponible dans le Manuel de l'OMM à http://www.astro.umontreal.ca/omm/manuel_fr.html.

¹⁰ <http://iraf.noao.edu/scripts/irafhelp?reidentify>

raies pour toutes les lignes de l'image, en procédant pour des spectres composés de 10 lignes à la fois. Une troisième fonction¹¹ permet d'ajuster un plan (ordre 6 en x et en y) à toutes ces données et une dernière¹² permet de rectifier les images en utilisant cet ajustement surfacique. À cette étape, peu importe la taille en pixels de la zone 390-910nm, les images sont coupées à ces valeurs et rééchantillonnées sur 1550 pixels de long avec une fonction du groupe `noao.onedspec`¹³. La calibration spectrale, pareille pour toutes les dates, est donc faite du même coup, $w1=390$ étant la longueur d'onde du début du spectre, $w2=910$ celle de la fin du spectre; cette plage de 520 nm étant étalée sur 1550 pixels ($\Delta\lambda = 0.335 \text{ nm/pix}$). De retour à IDL, on fabrique un vecteur qui contient la longueur d'onde pour chaque pixel à partir de ces informations.

Étape 7- Division par la PU médiane normalisée et élimination des franges d'interférence

La PU et les images scientifiques présentent des patrons de franges similaires mais qui semblent légèrement décalés spatialement l'un par rapport à l'autre. La solution utilisée ici est de modifier adéquatement la PU afin que la division habituelle des images par cette dernière permette d'éliminer complètement le patron de frange des images scientifiques. Une sous-procédure permet de séparer la PU en deux portions: une qui contient la variation pixel à pixel, la variation spatiale de haute fréquence, et l'autre qui contient les franges, la variation spatiale de plus basse fréquence. La valeur de chaque pixel est remplacée par la médiane des pixels voisins¹⁴. Les fréquences spatiales sont ainsi filtrées; seuls les patrons dont les variations spatiales sont inférieures à une valeur donnée sont conservés, ceux qui ont une échelle spatiale plus petite sont éliminés. En soustrayant cette version de la PU basse fréquence spatiale de l'image originale, on obtient une version haute fréquence spatiale.

¹¹ <http://iraf.noao.edu/scripts/irafhelp?fitcoords>

¹² <http://iraf.noao.edu/scripts/irafhelp?transform>

¹³ <http://iraf.noao.edu/scripts/irafhelp?dispcor>

¹⁴ <http://star.pst.qub.ac.uk/idl/MEDIAN.html>

La meilleure échelle spatiale a été déterminée à 3 pixels. Pour déterminer cette valeur, on a construit une version haute et basse fréquence pour différentes valeurs d'échelle. Pour chaque version de l'image haute fréquence, on a sélectionné de petites régions rectangulaires qui contenaient des franges mais pas d'autre variation notable. Ces régions de 10 pixels de haut, 30 pixels de large, se chevauchent sur plus de la moitié de leur hauteur et sur le tiers de leur largeur. La dispersion des pixels¹⁵ est minimale quand les franges sont le mieux éliminées.

Ensuite, la portion basse fréquence de la PU, qui contient les franges, est modifiée : plusieurs versions de l'image sont fabriquées en la décalant le long de la direction spectrale d'un nombre donné de pixels, habituellement de -10 pixels à 10 pixels, afin de trouver la version qui reproduit le plus fidèlement le patron de franges d'une image médiane des poses ES. Ce n'est pas toute l'image qui subit un décalage mais seulement la zone avec franges, là où la longueur d'onde est plus grande qu'environ 630 nm. Plusieurs versions de l'image moyenne sont créées en divisant cette dernière par les différentes versions décalées. On évalue la qualité d'élimination des franges de la même façon que pour la séparation de la PU en deux portions. Pour chacune des images ainsi créées, on évalue le degré de variation des pixels dans des régions avec franges mais sans autre variation importante. Le décalage optimal est celui qui minimise la déviation standard. Ce minimum est déterminé en faisant un ajustement polynomial d'ordre deux¹⁶.

En réalité, le décalage en longueur d'onde optimal varie en fonction de la longueur d'onde correspondant à la région étudiée et de la position spatiale sur le détecteur. Le décalage optimal à une position (x,y) de l'image est donc obtenu en extrapolant l'ajustement d'un plan de la forme $k+k_x x_{fr}+k_y y_{fr}+k_{xy} x_{fr} y_{fr}$ sur la surface du décalage optimal en fonction de la position du milieu de la région considérée. En additionnant ce décalage optimal à chaque

¹⁵ http://www.astro.washington.edu/docs/idl/cgi-bin/getpro/library14.html?ROBUST_SIGMA

La fonction `robust_sigma.pro` estime la déviation standard en calculant d'abord la déviation médiane absolue, c'est-à-dire la médiane des écarts absolus de chaque individu à la médiane du groupe. Elle utilise ensuite une procédure pour pondérer l'importance de chaque pixel et ainsi diminuer l'impact de ceux qui sont aberrants, comme les mauvais pixels par exemple.

¹⁶ http://star.pst.qub.ac.uk/idl/POLY_FIT.html

x initial, on obtient la nouvelle échelle spectrale pour chaque ligne. La version correctement décalée de la PU basse fréquence est obtenue en interpolant la version originale sur la grille irrégulière ainsi formée.

Le décalage optimal trouvé, la portion haute fréquence de la PU, non-modifiée, est ajoutée à la portion décalée. La même recette est suivie avec une médiane des images des MS. C'est finalement la moyenne des deux PU créées, relativement semblables, qui est utilisée comme PU optimale, par laquelle toutes les images scientifiques sont divisées, éliminant du même coup les franges et les petites variations pixel à pixel habituellement éliminées lors de la division par la PU.

Étape 8 - Soustraction du ciel et de la lumière dispersée

Selon la phase lunaire et la qualité de l'atmosphère au-dessus du lieu d'observation, le ciel autour de la Lune est éclairé par un halo plus ou moins lumineux et étendu. L'intensité n'est pas la même pour le ciel du côté cendré et pour celui de l'autre côté, le ciel ne sera donc pas corrigé lors de la division des ES par les MS. Une méthode de soustraction du ciel standard n'est évidemment pas applicable ici puisque la fente du spectrographe n'est pas assez longue pour avoir des lignes de spectre du ciel qui encadrent celles de lune en haut et en bas des lignes (7' de long pour 30' de diamètre pour la Lune).

L'observation des poses ES et MS nous indique que l'intensité du ciel près de la Lune diminue de façon approximativement linéaire en s'éloignant de celle-ci. De plus, l'intensité du ciel est négligeable relativement à celle du côté brillant de la Lune. Le ciel est donc corrigé seulement pour les poses ES, en ajustant une fonction linéaire au flux du ciel en fonction de la position spatiale. Le flux du ciel à la position de la Lune est ensuite soustrait en extrapolant cette fonction linéaire.

Étape 9 - Création des spectres à partir des images

Après avoir soustrait le ciel, la portion de l'image qui contenait les données du ciel est coupée. Il ne reste donc pour les images scientifiques que les lignes qui contiennent les spectres de Lune. Étant donné la variété des types de surface lunaire, le flux est parfois très

différent d'une ligne à l'autre des spectres ES ou MS. Par exemple, les spectres de vallée lunaire sont plus lumineux que ceux des cratères adjacents. Pour créer un seul spectre à partir des quelques centaines restantes, une moyenne pondérée des lignes est calculée. Un poids proportionnel à son flux moyen est attribué à chaque ligne.

Étape 10 – Correction pour la masse d'air

Une correction doit être appliquée pour la variation de l'absorption de l'atmosphère au dessus de l'observatoire selon les différentes masses d'air à travers lesquelles les poses ES et MS sont prises. Les données d'extinction de Kitt Peak, en Arizona¹⁷ et de Cerro Tololo, au Chili¹⁸ sont utilisées. Une fonction $ex(\lambda) \sim 1/\lambda^4$ est ajustée à ces données de transmission en fonction de la longueur d'onde. La courbe d'extinction ainsi obtenue est utilisée pour construire la correction spectrale propre à chaque masse d'air $corr(\lambda) = 10^{0.4 am ex(\lambda)}$. Les spectres sont multipliés par ces corrections.

Étape 11 – Correction pour la couleur de la Lune

La réflexion spectrale de la Lune, en principe éliminée lors de la division des spectres ES par les spectres MS, varie selon l'angle de phase (angle source-objet-observateur). Or, les poses MS sont obtenues avec un grand angle de phase puisque la source, le Soleil, est à l'opposé du lieu d'observation, la Terre, tandis que les poses ES sont prises avec un très faible angle puisque la source, la Terre, est aussi le lieu d'observation. Les données MS doivent donc être corrigées pour être comparables aux données ES. La correction appliquée ici, semblable à celle de Hamdani *et al.* (2006), exploite les données photométriques de la Lune de Korokhin *et al.* (2007). Cet article donne une version corrigée (pour tenir compte de la libration de la l'albédo lunaire) de la réflectivité données dans Lane and Irvine (1973) pour neuf bandes spectrales et dans les filtres UBV (couvre 300 à 1000nm) ainsi que pour 33 angles de phase compris entre -118.55° et -6.64° et entre 6.64° et 100.53° . La Figure A.3 montre ces données pour les 12 angles de phase positifs.

¹⁷ Tirées du fichier /usr/iraf/noao/lib/onedstd/kpnoextinct.dat dans le programme IRAF

¹⁸ Tirées du fichier /usr/iraf/noao/lib/onedstd/ctioextinct.dat dans le programme IRAF

Le flux en fonction de l'angle de phase est ajusté par une fonction exponentielle de la forme $a e^{-b(x-x_0)}$ à chaque longueur d'onde (Figure A.3, lignes aqua). À cause de la différence entre les données pour les angles de phases positifs et celles pour les angles négatifs, on choisit de ne considérer que les données pour les angles de phase du même signe que celui auquel ont été prises les données à corriger. Ainsi, si pour une nuit d'observation l'angle de phase était négatif (avant la nouvelle Lune), on n'utilisera pour corriger les spectres obtenus que les données pour les 21 angles de phases négatifs. Ensuite, on détermine la valeur de ces ajustements exponentiels à l'angle de phase de la nuit donnée (voir Figure A.3, étoiles orange). On obtient ainsi les valeurs des 12 longueurs d'onde. Ce sont ces valeurs qui sont ensuite ajustées avec un polynôme d'ordre 3 (Figure A.3, ligne rose). Cet ajustement, normalisé dans la région 660-680 nm, multiplie le spectre de MS pris à l'angle de phase en question.

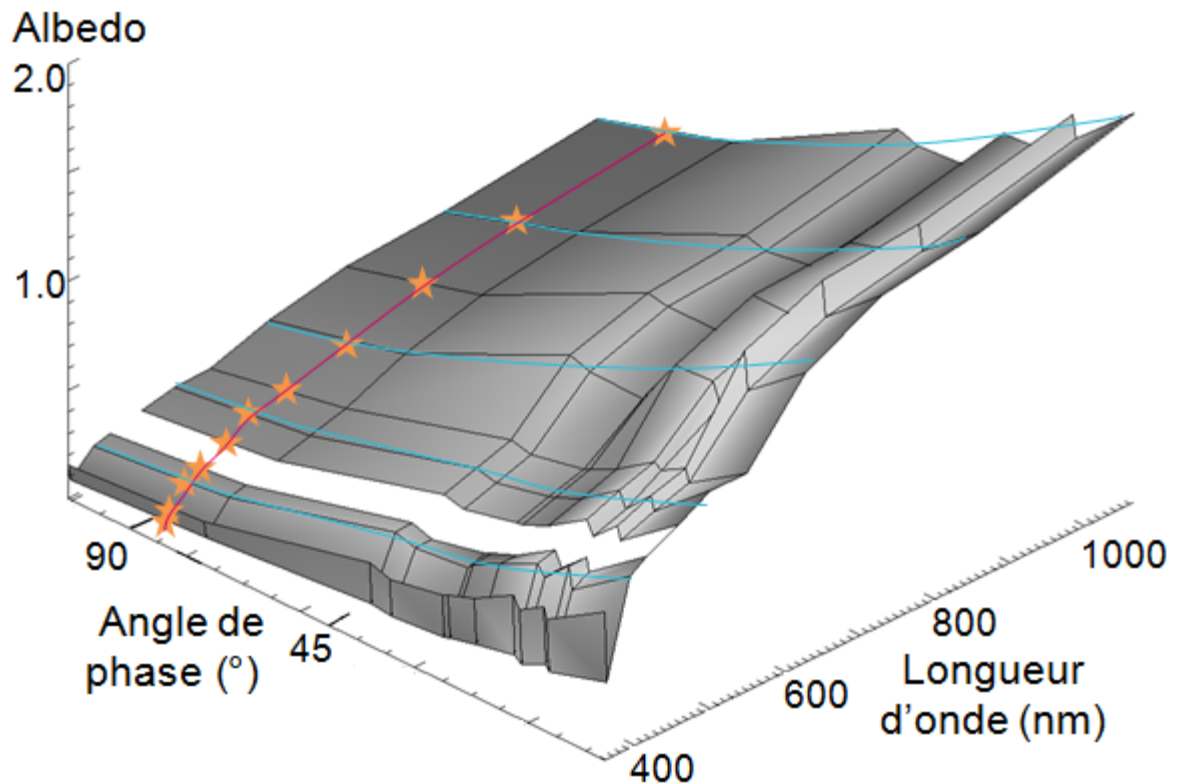


Fig. A.3 – Illustration de la méthode employée pour corriger les spectres MS pour la variation spectrale avec l'angle de phase. Seules les données avec un angle de phase positif sont montrées ici.

Étape 12 - Normalisation des spectres

Les spectres ES ont un flux moyen beaucoup plus faible que les spectres de MS. On normalise donc tous les spectres par rapport à la moyenne du flux calculée dans la région 660-680 nm.

Étape 13 – Grouper et diviser les spectres

Ici, il est utile d'afficher une ligne du temps avec toutes les poses MS et ES qui ont été prises (Figure A.4). Cela permet de déterminer les spectres MS ou ES qui ont été pris à des moments rapprochés dans le temps. Tous les spectres ES sont d'abord moyennés, selon leur flux moyen. Les spectres MS sont moyennés de la même manière. L'heure de pose des spectres créés est la moyenne des heures de pose et le temps d'exposition global Est la somme des temps d'expositions.

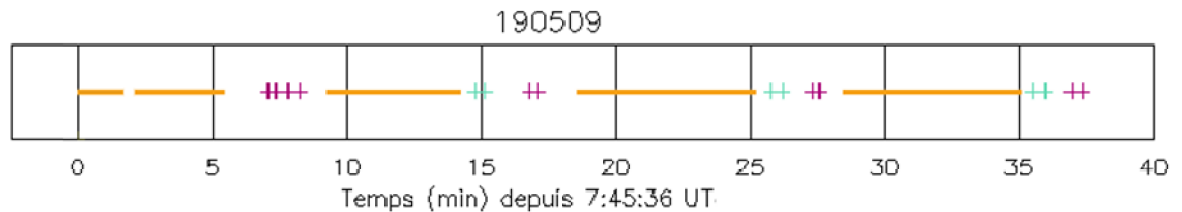


FIG. A.4 - Ligne du temps pour la séance d'observation du 19 mai 2009. Les lignes orangées représentent les poses ES, s'étalant sur quelques centaines de secondes. Les symboles « + » représente les poses courtes, les roses pour les MS et les verts pour les lampes de calibration.

La ligne du temps permet ensuite de déterminer pour chaque spectre ES, représenté par un trait orangé, les spectres MS, représentés par un symbole « + » rose, qui ont été pris avant et après. Ainsi, dans le cas idéal où il y a des spectres MS encadrant un spectre ES, comme pour les 3 derniers de la nuit présentée à la Figure A.4, une moyenne des deux spectres MS est faite, en leur accordant un poids inversement proportionnel à l'intervalle de temps qui sépare le spectre MS du spectre ES. S'il n'y a qu'une MS avant ou seulement une après, comme pour les deux premières poses ES de la Figure A.4, cette pose seule est utilisée.