

Colloque Français en Planétologie et Exobiologie 2024

1-5 juil. 2024

Nantes

France

Table des matières

Analyse physico-chimique des aérosols organiques formés dans un réacteur à plasma froid: Approche expérimentale en simulant l'atmosphère de Jupiter avec et sans H ₂ , Maëlle Bombled [et al.]	8
3D modeling of photochemical haze on the early Earth and exoplanets, Benjamin Charnay [et al.]	9
Ré-estimation des limites de la Zone Habitable à l'aide de nouvelles données d'opacité, Guillaume Chaverot [et al.]	11
Vers une caractérisation et compréhension plus complète de la dynamique atmosphérique d'Uranus et Neptune: le projet ANR SOUND, Sandrine Guerlet [et al.]	12
L'astronomie Antarctique: A la Recherche des Planètes Tempérées, Tristan Guillot	14
Temporal evolution of Saturn's last Great Storm between 2011 and 2013, Camille Lefour [et al.]	15
Sulphur chemistry in exoplanetary atmosphere: a concrete example of the impact of SO ₂ , Louis Maratrat [et al.]	17
Terrestrial planet formation from a ring, Alessandro Morbidelli [et al.]	18
Understanding the chemistry of temperate exoplanets atmospheres: A study of oxidized organic compounds as precursors of photochemical condensates, Oriane Sohler [et al.]	19
The interior of Jupiter using a high resolution magnetic field and secular variation model, Shivangi Sharan [et al.]	20
The Paleooceanography of The Southwest Subtropical Pacific during The Past 1.2 Myr, Vera Christanti Augusta [et al.]	21
Déterminismes et contingences dans la formation et l'évolution de la Terre et du vivant, Jean-Pierre Bibring	22

The origin of long-wavelength variations in crustal thickness on telluric planet., Valentin Bonnet Gibet [et al.]	24
StripesCounter : New method for cyclicity analysis, applied to paleoclimatology, Clara Boutreux [et al.]	25
Classifications complémentaires des dunes éoliennes basée sur : (i) la morphologie, (ii) la dynamique dunaire, (iii) la mécanique des fluides et le transport des sédiments, Sabrina Carpy [et al.]	26
Experimental study of the emergence of sublimation waves at various wind velocities and air pressures, Paul Eckstein [et al.]	28
Organic matter in Opal: in situ investigation with non destructive techniques, Simon Gouzy [et al.]	30
Fractionnement des éléments réfractaires pendant l'accrétion, Tahar Hammouda [et al.]	32
The fO ₂ of MORB glasses using a multi-proxy approach, Mikael Motte [et al.]	34
Seismic signature of iron-sulfur melt pockets: from the micro-structures to the bulk elastic properties, Adrien Néri [et al.]	36
Révision géophysique du diamètre du cratère d'impact Zhamanshin (Kazakhstan), Yoann Quesnel [et al.]	38
Inclusions de phosphate de calcium et de grains reliques de platinoïdes dans des tectites du Laos et de Côte d'Ivoire : implications sur l'impact australasien et son cratère d'origine., Pierre-Marie Zanetta [et al.]	39
Pluto and Charon observed with JWST, Tanguy Bertrand [et al.]	41
Seafloor hydrothermal control of ocean dynamics in Enceladus, Mathieu Bouffard [et al.]	42
Hydrodynamique capillaire extraterrestre, Daniel Cordier [et al.]	43
Density of carbonaceous organic matter in icy bodies, Camille Delarue [et al.]	44
Mécanismes de désorption, de piégeage, de formation et dissociation de sels, d'échanges isotopiques des molécules constituant les glaces astrophysiques, François Dulieu	46
After New Horizons, a new Pluto Climate Model for new challenges, Aurélien Falco [et al.]	47

The composition of the dust particles of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko suggests a pre-accretionary irradiated surface composition, Nicolas Fray [et al.] . . .	48
The Comet Interceptor mission, Pierre Henri [et al.]	50
Cohesive properties of ice powders and mixtures as analogues of regoliths of icy worlds, Benoît Jabaud [et al.]	51
Impact of melt accumulation on tidal heat production in Europa's mantle, Mathilde Kervazo [et al.]	53
Nouveau modèle de dégradation des cratères d'impact sur Cérès : sublimation de la glace et formation de talus., Noé Le Becq [et al.]	55
Altération d'organiques primordiaux : implications pour les satellites de glace et planètes naines, Pauline Lévêque [et al.]	58
Formation of chemically stratified layer in Ganymede's ocean: implications for upcoming JUICE mission, Mathis Pinceloup [et al.]	60
Microtexture de surface des satellites de glace, Frederic Schmidt [et al.]	61
Investigating the interior of Ganymede, Callisto and Europa with JUICE, Gabriel Tobie [et al.]	63
Enceladus as a Potential Niche for Methanogens and Estimation of Its Biomass, Laura Tenelanda	64
Processus de formation et durée d'activité d'un ancien réseau fluvial sur Mars, Victor Belissa [et al.]	65
Dipping Layers on Mars give insights into the planet's glacial history, Evan Blanc [et al.]	67
Des nouvelles de Perseverance et du programme de retour d'échantillons martiens (MSR), Agnès Cousin	68
Modélisation de l'environnement et de l'habitabilité de Mars à travers le temps : le projet " Mars Through Time ", François Forget [et al.]	70
Analyse par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse de matière organique en présence de sulfates : enseignements pour l'instrument SAM de la mission Mars Science Laboratory, Théo Govekar [et al.]	72
The triggering factors and mobility of Martian Landslides, Emma Genin [et al.] .	73

Negligible flow and deformation in the North Polar Layered Deposits, Mars, Anna Grau Galofre	75
Glacial and subglacial sculpture of a suite of four craters NE of Hellas basin, Mars, Anna Grau Galofre [et al.]	76
Distribution et caractéristiques morphologiques des escarpements glacés aux moyennes latitudes sur Mars., Noé Le Becq [et al.]	77
Unravelling the geological history of cratered worlds through machine learning techniques, Anthony Lagain [et al.]	80
Ice on the surface and in the subsurface of Mars: Review and new ideas, Lucas Lange [et al.]	81
CO2 Ice Properties and Structure using CRISM Data: a Glimpse into the Formation Mechanism of Martian Gullies, Apolline Leclef [et al.]	82
Un nouveau regard sur le croûte primitive de Mars à partir de la minéralogie accessoire et de l'altération de la météorite Black Beauty, Virgile Malarewicz [et al.]	84
Robust automatic crater detection on the full planet Mars using AI, Léo Martinez [et al.]	86
Molecular Biomarkers in Secondary Mineral Deposits of Mauna Loa Lava Tubes, Hawaii, as Analogs for Mars: Implications for Martian Habitability and Exploration, Maëva Millan [et al.]	87
Une Base de Données Climatiques Martiennes : la MCDv6.1, Ehouarn Millour [et al.]	89
La nouvelle réalité de la surveillance des tempêtes de poussière sur Mars, Luca Montabone	91
Mapping recent ice-rich deposits on Mars, Léo Scordia [et al.]	92
The evolution of Pliva Vallis, the outlet valley of the Jezero's crater lake on Mars, Justine Vilette [et al.]	95
Comprehensive analysis of the alteration of Tyrrhena Terra: Implications for source-to-sink processes on Mars, Yuchun Wu [et al.]	97
Quantitative Mineral Analysis of Zhurong Landing Area Based on In-situ SWIR Spectral Unmixing, Zhou Xiang [et al.]	99
Pitted cones in the late Hesperian lowland unit on Mars: Implications and Insights, Chaolin Zhang [et al.]	101

Optimizing adsorbent selection and adsorption-desorption conditions for the DraMS-GC injection traps of the Dragonfly mission, Alex Abello [et al.]	102
Modelling the climate in Titan’s lake regions, Audrey Chatain [et al.]	103
Etude des paramètres empiriques d’élargissement des raies du méthane dans les ailes lointaines, Thibaud Cours [et al.]	104
Le spectromètre de masse de Dragonfly : une symphonie instrumentale pour révéler la chimie azotée de Titan., Caroline Freissinet	105
A spherical & heterogeneous radiative transfer code for near-infrared remote sensing: application to Titan, Zili He [et al.]	106
Investigation expérimentale du dégazage et des caractéristiques chimiques des aérosols photochimiques organiques de Titan et d’exoplanètes, Orlène Kinsumuna Hondi [et al.]	108
Schumann Resonances as a tool to constrain Titan’s internal ocean: Re-assessment of Huygens observations and preparation of the EFIELD/Dragonfly experiment, Alice Le Gall [et al.]	110
Modeling Titan’s methane cycle at regional scales, Enora Moisan [et al.]	112
Brume et brouillard de Titan observés par Nirpsec/JWST, par VIMS/Cassini et comparaison avec le PCM Titan (de l’IPSL), Pascal Rannou [et al.]	114
Study of Titan’s thermal structure and seasonal variations with the Titan PCM, Lucie Rosset [et al.]	116
$^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ and $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ isotopic ratios in Titan’s stratospheric CO_2 , Sandrine Vinatier [et al.]	118
Microphysique des nuages de Titan : contraintes sur leur structure, leur formation et leur transport., Bruno De Batz De Trenquelléon [et al.]	120
Observability of atmospheric spatial variability by the VeSUV/VenSpec-U instrument onboard ESA’s EnVision mission, Lucile Conan [et al.]	122
The Radio-Science experiment onboard EnVision, Caroline Dumoulin [et al.]	123
3D modelling of the Venusian atmosphere: new results from the Venus PCM and mesoscale model, Maxence Lefevre [et al.]	124
Determination of Venus’ rotation state using radio-tracking data from the Venus Express spacecraft, Maëva Lévesque [et al.]	126

Le spectromètre VenSpec-U à bord d'EnVision, Emmanuel Marcq [et al.]	127
Viscosity of Venus' mantle as inferred from its rotational state, Yann Musseau [et al.]	129
The Venus Climate Database, VCD version 2.3, Ehouarn Millour [et al.]	131
Polar motion of Venus and Envision measurements, Pierre-Louis Phan [et al.] . .	133
VRExplorer an immersive and collaborative tool to multiply field trip experiences, François Civet [et al.]	134
IPSL climactions and the bottom-up ecological transformation of a climate research institute (2016-2024), Aurélien Falco [et al.]	136
Repenser la recherche en astrophysique à l'ère de la transition écologique : démarche et premiers résultats d'une enquête qualitative menée par le groupe de travail " coeur de métier de l'astrophysique " du collectif Labos1point5, Antoine Hardy [et al.]	137
L'expérience INGMAR en support aux observations : vers les astéroïdes et au-delà, Cateline Lantz [et al.]	139
Préparer les opérations spatiales depuis le laboratoire : utilisation du " flight spare " de MicrOmega/ExoMars, Damien Loizeau [et al.]	140
PyBWE : Une bibliothèque Python Open-Source pour l'application de méthodes de Super-Résolution aux Radars Sondeurs Planétaires, Nicolas Oudart [et al.] . .	142
Chemical analyses provided by CosmOrbitrap-based instruments for future space missions to ocean worlds, Laura Selliez [et al.]	144
OpenPlanetary, an "umbrella" non-profit organisation for open planetary science communities, Benoit Seignovert [et al.]	146
SSHADE-BandList: a database of absorption and Raman bands of solids of planetary interest, Bernard Schmitt [et al.]	149
Le Generic PCM : Un modèle de climat planétaire communautaire pour simuler toute la diversité des atmosphères planétaires, Martin Turbet [et al.]	151
Observations d'ondes et de particules par Mio/BepiColombo lors de ses survols de Mercure, Sae Aizawa [et al.]	153
Effects of ion irradiation on Mercury terrestrial analogues in the visible to mid-infrared, Emma Caminiti [et al.]	154

Do we need a heterogeneous mantle to explain the spectral properties of Mercury's volcanic basin infills?, Emma Caminiti [et al.]	156
Simulation de la réponse d'un lidar à forme d'onde, Barron Jean [et al.]	157
Caractérisation de la surface lunaire: des photos argentiques Apollo à la réalité virtuelle, Stéphane Le Mouélic [et al.]	158
Timing of explosive volcanic eruptions on Mercury, Mireia Leon Dasi [et al.]	160
Effects of porosity on the spectro-photometric properties of Phobos simulants, Antonin Wagnier [et al.]	161
Liste des participants	162
Liste des auteurs	167

Analyse physico-chimique des aérosols organiques formés dans un réacteur à plasma froid: Approche expérimentale en simulant l'atmosphère de Jupiter avec et sans H₂

Maëlle Bomble^d * ¹, Halima Ghorbel * [†] ¹, Ludovic Vettier ¹, Nathalie Carrasco ²

¹ PLANETO - LATMOS – Laboratoire Atmosphères, Observations Spatiales (LATMOS), Université Versailles St-Quentin, UPMC Université Paris 06, CNRS, LATMOS, 11 Boulevard d'Alembert, 78280 Guyancourt, France – France

² PLANETO - LATMOS – Laboratoire Atmosphères, Observations Spatiales (LATMOS), Université Versailles St-Quentin, UPMC Université Paris 06, CNRS, LATMOS, 11 Boulevard d'Alembert, 78280 Guyancourt, France, Ecole Normale Supérieure Paris-Saclay – France

Avec la mission JUICE de l'ESA qui a été lancée en 2023, on s'intéresse à l'étude de l'atmosphère de Jupiter, la plus grande planète de notre système solaire. Cette géante gazeuse est majoritairement constituée de dihydrogène, d'hélium et en plus faible proportion de méthane et d'ammoniac. Dans cette atmosphère, la chimie complexe conduit à la formation de petites particules organiques solides appelées tholins. Nous avons donc recours à élaborer expérimentalement, des analogues Jupiter dans une atmosphère avec et sans dihydrogène, à l'aide d'un réacteur à plasma froid " PAMPRE ". Les tholins obtenus ont été analysés en utilisant différentes techniques de caractérisation physico-chimique à savoir : spectromètre de masse in situ, la spectrométrie IR et un MEB pour étudier la réactivité chimique responsable de la formation de ces aérosols organiques ainsi que leur forme et leur taille. Nous avons aussi étudié la distribution granulométrique des particules en utilisant une nouvelle technique de caractérisation physique dans le laboratoire : la granulométrie laser. Notre travail consiste à l'étude physico-chimique de ces aérosols organiques présents sur Jupiter afin de comprendre les mécanismes responsables de leur formation, leur évolution et l'influence de la présence de H₂ sur les propriétés des tholins Jupiter.

*Intervenant

[†]Auteur correspondant: halima.ghorbel@latmos.ipsl.fr

3D modeling of photochemical haze on the early Earth and exoplanets

Benjamin Charnay ^{*} ¹, Thomas Leliboux ², Bruno De Batz De Trenquelléon ^{2,3}, Pascal Rannou ², Adam Yassin Jaziri ⁴, Thomas Drant ⁵, Franck Lefèvre ⁵, Nathalie Carrasco ⁵, Guillaume Le Hir ⁶

¹ Pôle Planétologie du LESIA – CNRS – France

² Groupe de spectrométrie moléculaire et atmosphérique (U. Reims) – Université de Reims - Champagne Ardenne – France

³ LMD – Laboratoire de Météorologie Dynamique – IPSL, École Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris, ENS, PSL Research University, Sorbonne – France

⁴ Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales – Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, Institut National des Sciences de l’Univers, Sorbonne Université, Centre National de la Recherche Scientifique – France

⁵ LATMOS – Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines (UVSQ) – France

⁶ Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP) – Université Paris VII - Paris Diderot, IPG PARIS, CNRS : UMR7154 – IPGP, 1 rue Jussieu, 75238 Paris cedex 05; France

The atmosphere of Archean Earth (3.8-2.5 Ga) was likely rich in methane produced by methanogenic organisms (1). When the CH₄/CO₂ ratio becomes higher than ~ 0.1 , organic haze forms according to photochemical models and laboratory experiments (2). Isotopic ratios of C and S in paleosols from 2.7 Ga suggest the episodic formation of photochemical haze (3). These episodes of haze formation could lead to glaciations (4) as the Pangola glaciation at 2.9 Ga. Organic haze are also of great astrobiological interest due to the associated of prebiotic molecules, and they could have played a key role in the origin of life on Earth (5). Finally, many exoplanets appear to be covered in photochemical haze. During this presentation, we will present the first results from 3D modeling of photochemical haze on the early Earth. We use a 3D climate model (the Generic Planetary Climate Model) coupled with a photochemistry module and a microphysical module. We describe the impact of atmospheric circulation on the distribution of haze, its consequences on climate and photochemistry in terms of UV shielding for NH₃ and sulfur gases. We discuss how the haze distribution could produce observable latitudinal variations in S-MIF. We will also present results for the application of this model to exoplanets (e.g. Trappist-1 planets).

References

(1) Sauterey et al., Nature Communications, 2020

(2) Trainer et al., PNAS, 2006

(3) Zerkle et al., Nature Geoscience, 2012

*Intervenant

- (5) Arney et al., *Astrobiology*, 2016
- (4) Wogan et al., *PSJ*, 2023

Ré-estimation des limites de la Zone Habitable à l'aide de nouvelles données d'opacité

Guillaume Chaverot ^{*† 1}, Emeline Bolmont ², Martin Turbet ^{3,4}

¹ Institut de Planétologie et d'astrophysique de Grenoble – Centre National d'études Spatiales [Toulouse], observatoire des sciences de l'univers de Grenoble, Centre National d'études Spatiales [Toulouse], Centre National d'études Spatiales [Toulouse], Centre National d'Études Spatiales [Toulouse] – France

² Département d'Astronomie, Université de Genève – Suisse

³ Laboratoire de Météorologie Dynamique (UMR 8539) – Institut National des Sciences de l'Univers, Ecole Polytechnique, Ecole des Ponts ParisTech, Sorbonne Université, Centre National de la Recherche Scientifique, Département des Géosciences - ENS Paris, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR8539 – France

⁴ Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux [Pessac] – Université de Bordeaux, Institut National des Sciences de l'Univers, Centre National de la Recherche Scientifique – France

Le concept de la Zone Habitable (ZH, *par ex.* *Kasting et al. 1993*) est extrêmement utile pour étudier des larges échantillons de planètes dans le cadre de la notion d'habitabilité (*par ex.* *Dressing & Charbonneau 2015, Bryson et al. 2021, Bergsten et al. 2022, Hill et al. 2022, Chen et al. 2023*). Dans leur travail clé, *Kopparapu et al. (2013, 2014)* ont fourni une équation simple et générique permettant d'estimer les limites de la ZH, pour différents types d'étoiles et masses planétaires. Dans un article récent (*Chaverot et al. 2022*), nous avons montré que les hypothèses utilisées dans *Kopparapu et al. (2013)* conduisent à une sous-estimation de l'émission thermique des planètes. Ceci pourrait induire une estimation inexacte du bord interne de la ZH. De plus, l'amélioration continue des bases de données spectroscopiques (HITRAN, HITEMP, ExoMOL, etc.), largement utilisées par la communauté des modélisateurs du climat, rend nécessaires des mises à jour régulières d'outils clés tels que la définition de la ZH. Un effort important est en cours pour produire de nouvelles tables d'opacité incluant les corrections expérimentales les plus récentes (*Chaverot et al. en prép.*). Suite à cela, nous proposons de présenter les résultats préliminaires d'une nouvelle estimation du bord interne de la ZH, basée sur la méthodologie utilisée dans *Kopparapu et al. (2013)*. De plus, nous élargissons cette étude en considérant différentes compositions atmosphériques, incluant des mélanges de H₂O, N₂ et CO₂ afin de représenter la grande variété de mondes que nous détectons (*par ex.* *Sing et al. 2016*). L'objectif final de ce travail est de proposer une nouvelle équation générique - valable pour différents types stellaires, compositions atmosphériques et masses planétaires - conçue pour être facilement utilisable par la communauté.

*Intervenant

†Auteur correspondant: guillaume.chaverot@univ-grenoble-alpes.fr

Vers une caractérisation et compréhension plus complète de la dynamique atmosphérique d'Uranus et Neptune: le projet ANR SOUND

Sandrine Guerlet ^{*} ^{1,2}, Noé Clément ³, Gwenael Milcareck ³, Oscar Carrion-Gonzalez ², Jeremy Leconte ³, Emmanuel Lellouch ², Raphael Moreno ², Arthur Le Saux ¹, Thibault Cavalié ³, Aymeric Spiga ¹, Ehouarn Millour ⁴

¹ LMD/IPSL – CNRS, Sorbonne Université, CNRS : UMR8539 – France

² LESIA – LESIA, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, Univ. Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, 5 place Jules Janssen, 92195 Meudon, France. – France

³ Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux – Université de Bordeaux (Bordeaux, France) – France

⁴ LMD/IPSL – CNRS, Sorbonne Université, CNRS : UMR8539 – France

Les atmosphères d'Uranus et Neptune présentent une activité dynamique soutenue : des orages fréquents, des vents zonaux rapides, des vortex polaires,... De par leur densité, ces planètes sont également considérées comme les archétypes de nombreuses exoplanètes. Cependant, du fait de leur distance, leur atmosphère reste peu étudiée : les observations les plus détaillées ont été réalisées lors d'un unique survol effectué par Voyager 2 il y a plus de 30 ans et relativement peu de travaux de modélisation ont été entrepris. Dans ce contexte, nous avons obtenu un financement de l'ANR impliquant le LMD, le LAB et le LESIA pour mieux comprendre la circulation atmosphérique d'Uranus et Neptune à travers le développement de modèles météorologiques et climatiques et l'analyse d'observations pour mesurer la vitesses des vents stratosphériques. Nous en présenterons le bilan après 4 ans de travaux.

Le premier volet du projet s'intéresse aux mécanismes gouvernant l'activité convective et orageuse de ces planètes à fine échelle spatiale. Ce modèle météorologique non hydrostatique couvre un domaine de 100 km avec une résolution horizontale de 2km afin de résoudre les panaches convectifs. Dans ces atmosphères, le méthane, présent en quantité variable entre 2 et 6% selon la latitude, condense vers 1.5 bars. Or, cette espèce est plus lourde que l'air ambiant (un mélange de dihydrogène et d'hélium), ce qui peut empêcher le déclenchement de la convection humide si une valeur critique de méthane est dépassée. Nous présenterons des résultats de simulation numérique qui permettent de caractériser l'activité convective (fréquence des orages, vitesse verticale des vents, extension verticale des panaches,...) selon la quantité de méthane considérée, représentant différents cas de figure rencontrés sur Uranus et Neptune.

Le second volet est consacré à la modélisation de la circulation à grande échelle. Ce modèle de climat résout cette fois les équations de la dynamique des fluides à l'échelle de la coquille 3D d'atmosphère dans sa globalité mais à une résolution horizontale plus grossière de ~ 500 km. Cela permet d'étudier l'établissement des régimes de vent ainsi que leurs moteurs (rôle du forçage

*Intervenant

saisonnier, des instabilités et des ondes planétaires). Les vents zonaux produits par le modèle sont qualitativement en accord avec ceux observés par la méthode de suivi des nuages mais nous montrerons que leur vitesse est assez largement sous-estimée. La structure thermique obtenue sera également discutée et comparée aux observations. Nous évoquerons les pistes d'amélioration en cours de développement, notamment en lien avec la prise en compte de l'activité convective à l'échelle sous-maille.

Enfin, le troisième volet vise à apporter des contraintes observationnelles inédites sur les régimes de vent dans la stratosphère. Pour cela, nous avons analysé des observations ALMA dans le sub-mm permettant de cartographier les décalages Doppler des raies de CO et HCN, sondant la stratosphère. Après soustraction de l'effet de la rotation planétaire, le décalage résiduel est interprété en terme de vitesse de vent. Les résultats obtenus sur Neptune montrent que l'organisation des vents stratosphériques est similaire à celle mesurée plus bas par suivi des nuages (par Voyager par exemple), avec cependant des vitesses moindres.

L'astronomie Antarctique: A la Recherche des Planètes Tempérées

Tristan Guillot * ¹

¹ Laboratoire Lagrange, CNRS, Observatoire de la Cote d'Azur – Université de Nice-Sophia Antipolis, Observatoire de la Cote d'Azur (OCA) – France

Installé à Concordia de 2010 à 2014 et depuis 2017, le télescope photométrique ASTEP (Antarctic Search for Transiting ExoPlanets) poursuit ses opérations et se focalise sur la découverte de planètes en transit à longues périodes. Depuis 2022, une nouvelle boîte caméra a été installée qui permet une photométrie simultanée dans le "bleu" (en dessous de 700nm) et dans le "rouge" (au dessus de 700nm), ce qui est un atout, à la fois pour identifier les binaires de fond et pour valider des transits peu profonds. Grace au support de l'Université de Birmingham, du STFC, de l'ESA et de l'INSU, l'équipe a pu développer une nouvelle monture à entraînement direct thermalisée pour des opérations jusqu'à des températures pouvant atteindre -80°C. Cette monture a été installée fin 2023, est en opération depuis le début des observations en mars et donne d'excellents résultats.

Au cours de ces années, les observations du télescope ASTEP ont permis de démontrer notre capacité à opérer automatiquement, en continu, dans les conditions extrêmes des hauts plateaux antarctiques. Les conditions météorologiques sont excellentes et la continuité des observations (du fait de la latitude de 75°S de la base Concordia, la plupart des étoiles visibles sont circumpolaires) permet d'accéder à des transits exoplanétaires impossibles à observer depuis des latitudes tempérées. La zone de visibilité d'ASTEP inclue les zones de visibilité continues (CVZ) sud de TESS, JWST, Ariel ainsi que le champ de PLATO.

A partir de 2025, en collaboration avec l'Université de Caltech, nous proposons d'installer un deuxième petit télescope infrarouge, Cryscope Pathfinder, qui a la particularité d'opérer en bande K (où le ciel antarctique est beaucoup plus sombre que partout ailleurs sur Terre) et en mode cryogénique. Ce télescope est un prototype permettant de démontrer le concept, tout en faisant de la science, de la découverte des exoplanètes en transit autour des naines M à la mesure de la courbe de phase de Jupiters chauds. A terme, l'installation de ces télescopes sur une tour, et le passage à un télescope de la classe des 1-2 m permettra de réellement tirer tout le parti des conditions astronomiques exceptionnelles du site de Concordia.

*Intervenant

Temporal evolution of Saturn's last Great Storm between 2011 and 2013

Camille Lefour ^{*} ¹, Thibault Cavalié ^{2,3}, Helmut Feuchtgruber ⁴, Thierry Fouchet ³, Emmanuel Lellouch ³, Raphael Moreno ³, Paul Hartogh ⁵, Leigh Fletcher ⁶

¹ Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux – Université de Bordeaux (Bordeaux, France) – France

² Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux – Université de Bordeaux (Bordeaux, France) – France

³ LESIA – LESIA, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, Univ. Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, 5 place Jules Janssen, 92195 Meudon, France. – France

⁴ Max Planck Institute for Extraterrestrial Physics, Garching – Allemagne

⁵ Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, Göttingen – Allemagne

⁶ School of Physics and Astronomy, University of Leicester, Leicester – Royaume-Uni

Saturn's atmosphere usually appears less active than its tumultuous neighbour Jupiter. But the 5th December of 2010, this steady evolution was disrupted by a perturbation in the troposphere in the northern hemisphere at 40°N, visible in the form of a bright white cloud (Fletcher et al. 2011, Fischer et al. 2011, Sanchez-Lavega et al. 2011). This storm quickly spread out in latitude over 30° and totally encircled the planet within a few weeks. Five previous giant storms were reported (Sanchez-Lavega et al. 2016), showing a periodicity of about 30 years (one per saturnian year). Given that the last one occurred in 1990, the giant storm of 2010 broke the cycle by showing up 10 years earlier than expected.

The initial tropospheric disturbance significantly altered the stratosphere, by changing temperatures, winds, transport and chemical composition (Fletcher et al. 2011, Fletcher et al. 2012, Moses et al. 2015). Only a month after the storm onset, two giant stratospheric hot spots, nicknamed "beacons", were reported at 40°N with a strong infrared emission. The differential velocities between these beacons resulted in their merging in May 2011, leading to a total increase of the temperature inside the new beacon of about 80 K compared to quiescent conditions. This increase in temperature had substantial consequences on the chemical composition inside the beacon (Fletcher et al. 2012) and in particular this might have completely altered the water profile (Moses et al. 2015).

We have conducted an observational campaign with the Herschel Space Observatory and its instrument PACS (Photodetector Array Camera and Spectrometer) in spectroscopy mode during the storm, from its beginning in 2011 up to 2013. In total, we have performed eight observations of the stratospheric water emission at 66 or 67 microns, with the aim of mapping the distribution of water inside and outside the beacon at different stages of its evolution. The analysis of the first observation one month after the onset did not show any significant alteration of the water profile during the storm (Cavalié et al. 2019) compared to further observations after the merging.

Here we report preliminary results of the analysis of the full dataset.

*Intervenant

References

- Cavalié et al. (2019), *Herschel map of Saturn's stratospheric water, delivered by the plumes of Enceladus*, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 630, id.A87, 15 pp.
- Fischer et al. (2011), *A giant thunderstorm on Saturn*, *Nature*, Volume 475, Issue 7354, pp. 75-77
- Fletcher et al. (2011), *Thermal Structure and Dynamics of Saturn's Northern Springtime Disturbance*, *Science*, Volume 332, Issue 6036, pp. 1413-
- Fletcher et al. (2012), *The origin and evolution of Saturn's 2011-2012 stratospheric vortex*, *Icarus*, Volume 221, Issue 2, p. 560-586
- Moses et al. (2015), *Evolution of stratospheric chemistry in the Saturn storm beacon region*, *Icarus*, Volume 261, p. 149-168.
- Sanchez-Lavega et al. (2011), *Deep winds beneath Saturn's upper clouds from a seasonal long-lived planetary-scale storm*, *Nature*, Volume 475, Issue 7354, pp. 71-74
- Sánchez-Lavega A, Fischer G, Fletcher LN, et al. The Great Saturn Storm of 2010–2011. In: Baines KH, Flasar FM, Krupp N, Stallard T, eds. *Saturn in the 21st Century*. Cambridge Planetary Science. Cambridge University Press; 2018:377-416.

Sulphur chemistry in exoplanetary atmosphere: a concrete example of the impact of SO₂

Louis Maratrat ^{*†} ¹, Orianne Sohier ², Ludovic Vettier ³, Nathalie Carrasco ⁴, Adam Yassin Jaziri ⁵, Audrey Chatain ^{6,7}

¹ PLANETO - LATMOS – Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines (UVSQ) – France

² PLANETO - LATMOS – Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales – France

³ Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales – Université de Versailles

Saint-Quentin-en-Yvelines : UMR8190, Institut national des sciences de l'Université : UMR8190, Sorbonne Université : UMR8190, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR8190, Institut National des Sciences de l'Université : UMR8190, Institut national des sciences de l'Université : UMR8190 – 11 boulevard d'Alembert Quartier des Garennes 78280 - Guyancourt, France

⁴ LATMOS – Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines (UVSQ) – France

⁵ Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales – Université de Versailles

Saint-Quentin-en-Yvelines, Institut National des Sciences de l'Université, Sorbonne Université, Centre National de la Recherche Scientifique – France

⁶ Universidad del País Vasco - Euskal Herriko Unibertsitatea – Espagne

⁷ Southwest Research Institute – États-Unis

Sulphur and more precisely sulfur dioxide (SO₂) is a compound currently observed in the atmospheres of the solar system (e.g Venus and Io (Ballester et al 1994)) but also beyond. This molecule has indeed been detected thanks to the JWST first observations in very diverse type of exoplanets: in the hot Jupiter WASP-39b (Tsai et al 2023), and potentially in two temperate sub-Neptunes TOI-270d (Benneke et al 2024) and WASP-107b (Dyrek et al 2023). Moreover, future JWST atmospheric characterization will probably reveal more sulfur species in other exoplanets to extend this non-exhaustive list. However, despite the recurrence of sulfur species in the atmospheres of planetary systems, the atmospheric chemistry of such mixture has never been really explored experimentally (He et al 2020). In this work, we try to investigate the influence of SO₂ on a N₂-CH₄ mixture which is known to generate easily a big diversity of organic molecules up to C-4. Thus, how the presence of sulfur will affect this complex N₂-CH₄ organic chemistry? To address this question plasma experiments, which are used to simulate the photochemistry in high atmosphere of exoplanets, were performed on different N₂/CH₄/SO₂ mixtures with various SO₂ amount from 10% to 0.1%. The resulting gaseous species were analyzed by mass spectrometry. Moreover, the solid matter formed was studied first by elementary analysis to estimate its chemical composition and then by Infrared spectroscopy.

*Intervenant

†Auteur correspondant: louis.maratrat@latmos.ipsl.fr

Terrestrial planet formation from a ring

Alessandro Morbidelli ^{*† 1,2}, Jason Woo ^{1,3}, David Nesvorny ⁴

¹ Observatoire de la Côte d’Azur – Institut National des Sciences de l’Univers, Centre National de la Recherche Scientifique – France

² Collège de France, Paris – Collège de France – France

³ Institut für Planetologie [Münster] – Allemagne

⁴ Southwest Research Institute [Boulder] – États-Unis

It has been long proposed that, if all the terrestrial planets form within a tiny ring of solid material at around 1 AU, the concentrated mass-distance distribution of the current system can be reproduced. Recent planetesimal formation models also support this idea. In the ERC-funded Holyearth project, we revisit the ring model by performing a number of high-resolution N-body simulations for 10 Myr of a ring of self-interacting planetesimals, with various radial distributions of the gas disc. We find that even if all the planetesimals form at ~ 1 AU in a minimum mass solar nebula-like disc, the system tends to spread radially as accretion proceeds, resulting in a system of planetary embryos lacking mass-concentration at ~ 1 AU. Modifying the surface density of the gas disc into a concave shape with a peak at ~ 1 AU helps to maintain mass concentrated at ~ 1 AU and solve the radial dispersion problem. We further propose that such a disc should be short lived (≤ 1 Myr) and with a shallower radial gradient in the innermost region (< 1 AU) than previously proposed to prevent a too-rapid growth of Earth. We then extend our simulations beyond the gas-disc stage, covering ~ 200 Myr and accounting for the phase of giant planet instability, assumed to happen at different times. About half of the simulations form Venus and Earth analogues, and about 10% form a Mars analogue. We find that the timing of the giant planet instability affects the terrestrial system’s excitation state and the timing of the last giant impacts. Hence a late instability (~ 60 to 100 Myr after the solar system’s birth) would explain a late Moon-formation time, as suggested by radioactive chronometers. However, in this case the late veneer mass (LVM: mass accreted after the last giant impact) of the Earth-sized planets is usually an order of magnitude lower than the value inferred from geochemistry. In addition, the final angular momentum deficit (AMD) of the terrestrial planets tends to be too high. We discuss potential solutions to these problems that may reconcile a late Moon-forming event with the low AMD of the terrestrial planet and relatively large LVM.

*Intervenant

†Auteur correspondant: Alessandro.Morbidelli@oca.eu

Understanding the chemistry of temperate exoplanets atmospheres: A study of oxidized organic compounds as precursors of photochemical condensates

Orianne Sohier ^{*} ¹, Adam Yassin Jaziri ², Ludovic Vettier ³, Nathalie Carrasco ⁴, Audrey Chatain ^{5,6}, Louis Maratrat

¹ PLANETO - LATMOS – Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales – France

² Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales – Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, Institut National des Sciences de l'Univers, Sorbonne Université, Centre National de la Recherche Scientifique – France

³ Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales – Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines : UMR8190, Institut national des sciences de l'Univers : UMR8190, Sorbonne Université : UMR8190, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR8190, Institut National des Sciences de l'Univers : UMR8190, Institut national des sciences de l'Univers : UMR8190 – 11 boulevard d'Alembert Quartier des Garennes 78280 - Guyancourt, France

⁴ Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales (LATMOS) – UMR 8190 – France

⁵ Universidad del País Vasco - Euskal Herriko Unibertsitatea – Espagne

⁶ Southwest Research Institute – États-Unis

Characterizing the atmospheres of small temperate exoplanets poses a major scientific challenge. The James Webb Space Telescope gives us the opportunity to study temperate exoplanets as small as mini-Neptunes. Recent observations of K2-18b and TOI-270d have revealed atmospheres rich in hydrogen and carbon compounds. Methane and carbon dioxide have been detected in significant amounts. However, understanding the chemistry governing these atmospheres remains largely unconstrained. Therefore, modeling and laboratory experiments are necessary to better understand these observations.

Developing our knowledge of these atmospheres will help to characterize their habitability.

In this context, we have conducted experimental simulations. Using a cold plasma reactor, we simulate the out-of-equilibrium chemistry occurring in the upper layers of temperate exoplanets. We used mass spectrometry and infrared spectroscopy to track the chemical evolution of gas mixtures similar to exoplanetary atmospheres. Our observations highlight the production of complex

organic compounds, carbon monoxide, and water vapor. Additionally, our first results suggest that oxidized organic compounds are formed, which are potential precursors to photochemical condensates of prebiotic interest.

*Intervenant

The interior of Jupiter using a high resolution magnetic field and secular variation model

Shivangi Sharan ¹, Benoit Langlais ^{*† 2}, Hagay Amit ², Erwan Thébaud ³,
Mathis Pinceloup ², Olivier Verhoeven ²

¹ Department of Physics [Imperial College London] – Royaume-Uni

² Laboratoire de Planétologie et Géosciences

[UMR_C6112] – –*CNRS, NantesUniversit, CNRS : UMR6112 – –France*

³ Laboratoire Magmas et Volcans – Unité Clermont Auvergne, CNRS – France

Unique information about the dynamo process acting at Jupiter can be inferred by modeling and interpreting its magnetic field. We use the fluxgate magnetometer measurements acquired during the first 5 years, or first 38 orbits, of the Juno mission, and we derive a magnetic field model which describes simultaneously the main field and the secular variation (SV) up to spherical harmonic degrees 16 and 8, respectively. Apart from the Earth's, this is the first time another planetary magnetic field along with its time variation is described to such a high degree. We use properties of the power spectrum of the static field to infer the upper boundary of the dynamo convective region at 0.830 ± 0.022 Jupiter radius. The SV varies at a rate of 0.6% per year while the correlation times are relatively comparable to the Earth's and indicate that the field is dominated by advection. The field and SV morphologies suggest zonal as well as non-zonal deep fluid motions.

*Intervenant

†Auteur correspondant: benoit.langlais@univ-nantes.fr

The Paleooceanography of The Southwest Subtropical Pacific during The Past 1.2 Myr

Vera Christanti Augusta ^{*† 1,2}, Mary Elliot ¹

¹ Laboratoire de Planétologie et Géosciences

[UMR_{C6112}] – – *Universit Nantes Angers Le Mans, CNRS, CNRS : UMR6112 – – France*

² National Research and Innovation Agency – Indonésie

The Mid-Pleistocene Transition (MPT) refers to a significant change in the Earth's climate cycle that occurred approximately 1 to 1.2 million years ago. Before the MPT, the dominant periodicity of climate cycles was characterized by approximately 41,000-year cycles. During the MPT, there was a shift in the dominant periodicity of glacial-interglacial cycles to longer intervals of about 100,000 years. This transition is marked by a change in the pacing and amplitude of ice age cycles recorded in geological and paleoclimatic data. Our study will use sample MD06-3018 from 2470 m depth in the eastern side of New Caledonia Trough (NCT), collected during the Marion Dufresne cruise in 2006. Based on multi-species planktonic foraminiferal geochemical proxies, here we reconstruct the vertical thermal-hydrological variabilities over the last 1.2 million years in the west part of New Caledonia. We used four different species of foraminifera: *Globigerinoides ruber*, *Pulleniatina obliquiloculata*, *Neoglobobuadrina dutertrei*, and *Globorotalia truncatulinoides*. From several previous research, we know that different types of foraminifera can describe the different forces during the glacial-interglacial period and during different times. Our preliminary research suggests strong variability in vertical water gradient in the southwest of the Pacific Ocean.

*Intervenant

†Auteur correspondant: vera-christanti.agusta@etu.univ-nantes.fr

Déterminismes et contingences dans la formation et l'évolution de la Terre et du vivant

Jean-Pierre Bibring * ¹

¹ Institut d'Astrophysique Spatiale – CEA, CNRS, Université Paris-Saclay – France

L'exploration spatiale du système solaire et la caractérisation des exoplanètes induit des changements profonds de paradigmes parfois ancestraux, dans notre représentation des mondes planétaires : par la précision considérablement accrue dans la connaissance de leurs propriétés, ceux-ci se distinguent désormais par un degré de *diversité* non anticipé, pour l'essentiel des propriétés sondées.

Plus récemment encore, par l'apport couplé de modélisation très approfondies, les processus responsables de cette diversité commencent à être déchiffrés. Ils mettent en évidence le rôle respectif des lois physiques, déterministes par essence, et de la contingence (contextuelle) des événements qui ont jalonné l'évolution de chacun des objets – dont l'imprédictibilité conduit à les baptiser " hasards ". Des migrations et instabilités gravitationnelles aux impacts géants, les exemples se font de plus en plus nombreux.

L'un des facteurs clés qui façonnent cette diversité est l'extrême *sensibilité* de leurs effets à la *spécificité* des paramètres en jeu. Les conséquences de l'impact de Theia sur l'évolution de la Terre (système Terre-Lune, bien sûr, mais également nombre de propriétés terrestres singulières, de sa tectonique à ses couvertures nuageuse, océanique et atmosphérique) en sont exemplaires. Elles suggèrent de prolonger la *diversité* observée en l'*unicité* de chaque objet analysé, malgré le très grand nombre (probable) de planètes dans l'Univers (observable).

Ceci s'avère le cas de la Terre elle-même, interrogeant la notion d'exoTerre, si le terme de *Terre* intègre désormais la somme des propriétés qu'on lui découvre – somme réclamant une trajectoire évolutive d'extrêmes singularités, au gré d'innombrables bifurcations orientées contextuellement. Et tout autant correspondre au *vivant*, quand se révèle par exemple l'extrême *singularité* du chemin réactionnel qui a conduit à la synthèse des protéines et des ribosomes : clés de la propriété qualifiante du vivant, par l'hérédité des fonctions acquises comme traduction du code génétique. Le vivant apparaît comme l'une des propriétés *terrestres* par essence : forme spécifique de la chimie cosmique du carbone, intimement liée (continument adaptée) aux processus de formation puis d'évolution de la Terre ; double ensemble de contingences couplées.

La proposition d'unicité du vivant interroge donc de front la genericité du concept d'habitabilité. Elle remet en cause l'existence d'un " principe de vie ", qui permettrait de le proposer existant sous d'autres formes, ou nourri d'autres ingrédients, *ailleurs* que sur Terre. Par là-même, la notion d'origine, par émergence postulée d'un tel principe, de telle propriété ou de tel ingrédient

*Intervenant

qualifiant, depuis un monde inerte qui en serait globalement dépourvu vers l'ensemble du monde vivant, qui en serait détenteur, pourrait (devrait) être sinon remplacée, au moins intégrée en celle d'un *continuum de transformations*.

Celles-ci auraient façonné l'évolution de la matière organique depuis les phases présolaires, via le disque protosolaire où des propriétés singulières auraient été synthétisées : par exemple des excès particuliers de chiralité, ouvrant à l'homochiralité d'acides aminés et de sucres, ou des structures moléculaires dotées de solubilités ou de capacités réactionnelles spécifiques. Elles seraient présentes dans des grains extraterrestres (tels qu'observés avec Rosetta/Philae, ou analysés – nous en donnerons des exemples - avec Hayabusa2, et bientôt OsirisRex). " Ensemencés " dans des océans terrestres aux propriétés elles-mêmes singulières (réactifs, catalyseurs etc...), ils auraient favorisé des chaînes de réaction très spécifiques, vers le *vivant* : ensemble, elles définissent ce que *furent* les conditions d'*habitabilité* de la Terre.

L'évolution ne répondrait à aucun sens prédéterminé, serait-ce du simple vers le complexe, sa représentation n'acceptant aucune " flèche " ciblée ; au profit d'une trajectoire faite d'infinies changements d'orientation, étendant la vision darwinienne bien en amont de sa déclinaison biologique. Une telle évolution, par continuum de transformations contextuellement orientées, s'émancipe des binarités vivant/inerte, hasard/nécessité, inné/acquis, déterminisme/contingence, dont les pertinences sont faussement ressenties d'évidence.

Ces changements de paradigmes induits par l'exploration spatiale appellent une évolution de la définition et des objectifs de ses missions futures (en particulier en ce qui concerne les aspects " exobiologiques ", tels MSR, lunes glacées etc...). Pour nos communautés, un atout considérable : la poursuite d'un développement technologique et instrumental réellement innovant (dont l'excellence acquise est aujourd'hui contestée...). Avec pour objectif, de s'inscrire dans les nouveaux axes de questionnement scientifique, qui irriguent tant de champs sociétaux ; et d'ainsi répondre aux défis de ce siècle. Nous en suggérerons des exemples.

The origin of long-wavelength variations in crustal thickness on telluric planet.

Valentin Bonnet Gibet * ¹, Chloé Michaut

¹ Institute of Planetary Research, German Aerospace Center (DLR), Berlin, Germany – Allemagne

Long-wavelength topography variations are present on telluric planets. They are often associated to long-wavelength crustal thickness variations and define different geological provinces. Mars and the Moon both display a hemispherical dichotomy in topography. The southern hemisphere of Mars and the far side of the Moon constitute the highlands of the planets, while the opposite hemispheres concentrate topographic lows: the Martian plains and the Lunar mare. Venus also shows highlands surrounded by volcanic plains, but not on a hemispheric scale. On Earth, the present-day difference in topography between continents and oceans is not hemispheric either and is, in this case, the result of plate tectonics. Mercury seems to be an exception, with no observed long-wavelength variations in topography.

On one-plate planets, a positive feedback mechanism exists between crust thickness and melt extraction: thicker crusts contain more radioelements and are thus hotter, promoting more melting at depth and more extraction of crust where the crust is thick. This mechanism enables the spontaneous formation of thick crust regions (Bonnet Gibet et al. 2022). A linear stability analysis shows that long-wavelength variations in crustal thickness, in particular the hemispherical one, are favoured by this mechanism as shorter wavelengths are more attenuated by diffusion of heat in the lithosphere. Additionally, the smaller the planet, the more the hemispherical wavelength is favoured. The growth of a perturbation in crustal thickness is however dampened by the cooling of the planet, which impedes the formation of mantle melts.

Based on an asymmetric parametrized thermal evolution model accounting for crust extraction, we show that this positive feedback mechanism can explain the formation of the Martian dichotomy. On the contrary, on Mercury, which has a thin silicate shell and small internal heating, cooling is too fast for this mechanism to produce a significant dichotomy in crustal thickness. Mars seems therefore to present the optimal size for the growth of a hemispheric crustal dichotomy.

*Intervenant

StripesCounter : New method for cyclicity analysis, applied to paleoclimatology

Clara Boutreux ^{*†} ¹, Patrick Brockmann ², Mary Elliot ¹, Matthieu Carré ³

¹ Laboratoire de Planétologie et Géosciences

[UMR_C6112] – –*Université Nantes Angers Le Mans, CNRS, CNRS : UMR6112 – –France*

² Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement [Gif-sur-Yvette] (LSCE - UMR 8212) – Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines (UVSQ), CEA, CNRS : UMR8212 – LSCE-CEA-Orme des Merisiers (point courrier 129) F-91191 GIF-SUR-YVETTE CEDEX LSCE-Vallée Bât. 12, avenue de la Terrasse, F-91198 GIF-SUR-YVETTE CEDEX, France

³ Laboratoire d'Océanographie et du Climat : Expérimentations et Approches Numériques – CNRS, Institut de recherche pour le développement [IRD], Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN) – France

In the current context of global change, it has become increasingly critical to understand and predict the impact on interannual climatic variability due to its impacts societies and economies. This is particularly relevant in the Indo-Pacific Warm Pool (IPWP) region, where phenomena such as the El Niño-Southern Oscillation (ENSO), the Indian Ocean Dipole (IOD), and the Indo-Asian monsoon significantly influence precipitation, atmospheric and oceanic temperatures, as well as currents and salinity. Giant clams (*Tridacna* spp.), the largest family of bivalve molluscs, inhabit the shallow and warm waters of tropical zones. Their longevity and aragonite shells serve as valuable climate archives, offering seasonal to diurnal chronology with exceptional sensitivity to environmental variations. This study analyses the growth rings of modern and fossil shells from the island of Belitung, located east of Sumatra in the Java Sea, Indonesia. Daily increments of shell growth were measured by utilizing high-resolution imaging obtained through confocal laser scanning microscopy (LSCM) and StripesCounter software. The results highlight firstly the reproducibility of this daily resolution study method and secondly, how shell growth responds to seasonal climatic variability in the region. These findings demonstrate the method's reliability for high temporal resolution studies at daily resolution, enabling the detection of fine variations in growth data. Additionally, they reveal that shell growth is sensitive to seasonal changes, providing insights into past climatic conditions. Sclerochronology is a high-resolution method for paleoenvironmental and paleoclimatic analysis. We envisage that such counting and measuring techniques for growth increments can be used in other paleoclimatology studies, like dendrochronology, as well as in other areas to investigate the cyclicity of the formation of other, more complicated structures. Its versatility broadens research possibilities by offering a detailed analysis of growth cycles and environmental variations, facilitating a better understanding of historical and natural processes in various scientific contexts.

*Intervenant

†Auteur correspondant: clara.boutreux@etu.univ-nantes.fr

Classifications complémentaires des dunes éoliennes basée sur : (i) la morphologie, (ii) la dynamique dunaire, (iii) la mécanique des fluides et le transport des sédiments

Sabrina Carpy ^{*† 1}, Sylvain Courrech Du Pont ², David Rubin ³, Clément Narteau ⁴, Mathieu G. A. Lapotre ⁵, Mackenzie Day ⁶, Philippe Claudin ⁷, Ian Livingstone ⁸, Matt Telfer ⁹, Jani Radebaugh ¹⁰, Cyril Gadal ¹¹, Andrew Gunn ¹², Charles Bristow ¹³, Andreas Baas ¹⁴, Ryan Ewing ¹⁵

¹ Laboratoire de Planétologie et Géosciences
[UMR_C6112] – –NantesUniversit, UnivAngers, LeMansUniversit, CNRS, CNRS :
UMR6112 – –France

² Université Paris-Cité – Université Paris Cité, Université Paris Cité – France

³ Earth and Planetary Sciences [University of California Santa Cruz] (UC Santa Cruz) – 1156 High Street Santa Cruz, CA 95064, États-Unis

⁴ IPGP – Université Paris Cité, Institut de physique du globe de Paris, CNRS, F-75005 Paris, France – France

⁵ Stanford University – États-Unis

⁶ Earth, Planetary and Space Sciences, University of California, Los Angeles, CA, USA – États-Unis

⁷ Physique et Mécanique des Milieux Hétérogènes, ESPCI, CNRS – ESPCI – France

⁸ The Graduate School, The University of Northampton – Royaume-Uni

⁹ School of Geography, Earth and Environmental Sciences [Plymouth] – Royaume-Uni

¹⁰ Brigham Young University – États-Unis

¹¹ Dept. of Mathematics and Manchester Centre for Nonlinear Dynamics, The University of Manchester – Royaume-Uni

¹² Monash University [Clayton] – Australie

¹³ Department of Earth and Planetary Sciences, University of London – Royaume-Uni

¹⁴ King's College London – Royaume-Uni

¹⁵ School of Geography and the Environment [Oxford] – Royaume-Uni

Lorsque les vents soufflent sur un lit de sédiments mobilisables, des dunes se forment. Ces conditions sont courantes sur Terre, planète sur laquelle les dunes abondent dans les intérieurs continentaux arides et le long des côtes sablonneuses. Des champs de dunes ont été également observés sur d'autres corps planétaires, tels que Vénus, Mars, Titan, Pluton et même la comète 67P. Malgré les conditions relativement simples requises pour leur formation, les dunes adoptent une grande diversité de formes, de tailles et de comportements en réponse à leurs conditions aux limites et à d'autres facteurs environnementaux.

Lors d'un workshop à la Fondation des Treilles dans le sud de la France, notre communauté multidisciplinaire composée de géomorphologues, sédimentologues, géographes, physiciens et planétologues a travaillé ensemble pour proposer une nouvelle classification des dunes éoliennes basée

*Intervenant

†Auteur correspondant: sabrina.carpy@univ-nantes.fr

sur la morphologie, les processus et la mécanique des fluides (1).

Ce travail collectif nous a permis de proposer une série de trois schémas simplifiés de classification des dunes basés sur les connaissances les plus récentes en matière de morphologie des dunes, de processus morphogénétiques et de couplage entre le lit de sable, l'écoulement des fluides et le transport des sédiments. Ensemble, ces classifications fournissent un cadre unifié pour décrire les dunes éoliennes sur Terre et au-delà, à travers leur forme, leur dynamique et leur taille en réponse aux vents et à d'autres conditions aux limites.

(1) Complementary classifications of aeolian dunes based on morphology, dynamics, and fluid mechanics, S. Courrech du Pont et al, *Earth-Science Reviews* (2024), in press. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.105444>

Experimental study of the emergence of sublimation waves at various wind velocities and air pressures

Paul Eckstein ^{*† 1}, Sabrina Carpy^{‡ 1}, Philippe Claudin ², Jonathan Merrison ³, Jens Jacob Iversen ³, Laurent Perret ⁴, Philippe Navaro ⁵, Marcelle Rolande Mbitkeu-Njeuya ⁵, Tanguy Bertrand ⁶

¹ Laboratoire de Planétologie et Géosciences de Nantes – CNRS : UMR6112 – France

² Physique et mécanique des milieux hétérogènes (UMR 7636) – PMMH, CNRS, ESPCI Paris, Université PSL, Sorbonne Université, Université Paris Cité – France

³ Department of Physics and Astronomy, Aarhus University, 8000 Aarhus C – Denmark

⁴ Laboratoire de recherche en Hydrodynamique, Énergétique et Environnement Atmosphérique – Nantes Université, Ecole Centrale Nantes, CNRS, LHEEA, UMR 6598, F-44000 Nantes, France – France

⁵ Université de Nantes – UFR Sciences – France

⁶ Pôle Planétologie du LESIA – CNRS – France

Sublimation waves are formed by the sublimation of icy substrates under turbulent winds. They are ripple or scallop-like bedforms that emerge as a result of an instability enhanced by local feedback caused by flow disturbance generated by small topographic disturbance. Sublimation waves are expected to be found on many planetary surfaces with volatile ices in contact with an atmosphere. They are periodic, linear and transverse bedforms of different scales (centimeter to decameter) depending on their dry windy environment. Apart from specimen found on the Blue Ice Areas in Antarctica (Weller, 1969; Mellor and Swithinbank, 1989; Bintanja et al, 2001) and on the walls of ice caves (Curl, 1966), very few field measurements have been collected on sublimation waves.

The wavelength, formation time and migration velocity of sublimation waves found in ice caves and Antarctic blue ice areas on Earth, as well as on the Martian North polar cap can be linked by a set of scaling laws derived from a linear stability analysis (Claudin et al, 2017) of a coupled model with a turbulent boundary layer over a sublimating substrate (Bordiec et al, 2020; Carpy 2023). However, experiments to recreate sublimation waves have not yet managed to establish the validity of these scaling laws by systematically varying the parameters involved (wind velocity, fluid viscosity). In preparation of experiments on sublimation waves, we have also investigated the flow pattern across artificial bedforms to validate the predicted phase lag required for the instability to appear.

On the proposed poster, we will present an overview of the phenomenon including the instability model and the investigation on the phase lag of the flow. We will then report on the first results of our latest experimental campaign in the Aarhus Wind Tunnel Simulator II, where we could study the morphological evolution of the ice surface under different wind speeds and atmosphere viscosity configurations. REFERENCES: *Bordiec, M. et al. (2020) Earth & Sci. Reviews. Sci.*,

*Intervenant

†Auteur correspondant: paul.eckstein@univ-tlse3.fr

‡Auteur correspondant: sabrina.carpy@univ-nantes.fr

103350 ; *Weller, G. (1969) Journal of Glaciology, 8(53) :277–284 ; Mellor, M. et al. (1989) Technical report, Hanover NH ; Bintanja, et al. (2001) Journal of Glaciology, 47(158) :387–396 ; Curl (1966) Transactions Cave Research Group of Great Britain, 7(2) : 121–160 ; Claudin, P. et al. (2017) J. Fluid Mech. 832, R2; Carpy, S. et al. (2023) Frontiers in Astronomy and Space Sciences, 10;*

Organic matter in Opal: in situ investigation with non destructive techniques

Simon Gouzy ^{*† 1,2}, Thi Hai Van Phan ³, Benjamin Rondeau ¹, Vassilissa Vinogradoff ², Boris Chauviré, Pierre Beck ⁴, Gerhard Franz ⁵, Vladimir Khomenko ⁶, John Carter ⁷

- ¹ Laboratoire de Planétologie et Géosciences [UMR_C6112] –
–*Universitd' Angers, InstitutNationaldesSciencesdel'Univers, CentreNationaldelaRechercheScientifique, Nantesun*
UF RdesSciencesetdesTechniques, Universitd' Angers :
UMR6112, InstitutNationaldesSciencesdel'Univers :
UMR6112, CentreNationaldelaRechercheScientifique : UMR6112 – –France
- ² Physique des interactions ioniques et moléculaires – Aix Marseille Université, Centre National de la Recherche Scientifique, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR7345 / UMR6633 / URA773, Aix Marseille Université : UMR7345 / UMR6633 / URA773 – France
- ³ Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble – Université Grenoble Alpes, Centre national de la recherche scientifique - CNRS (France) – France
- ⁴ Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble – Centre Nationale de la Recherche Scientifique, Université Grenoble Alpes – France
- ⁵ Institut für Angewandte Geowissenschaften [Darmstadt] – Allemagne
- ⁶ M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation, The National Academy of Sciences of Ukraine – Ukraine
- ⁷ Institut d'astrophysique spatiale – Centre National de la Recherche Scientifique - CNRS, Université Paris-Saclay, Sorbonne Universités – France

Opal (amorphous silica, SiO₂.nH₂O) is a glassy and porous mineral formed by the aqueous alteration of silicate rocks through both weathering and hydrothermalism. Terrestrial and Martian observations, as well as fluid-rock alteration experiments, show that opal forms in various geological contexts (e.g., acidic volcanic traps, alluvial fans and deltas) and at different spatial scales (nanometers to kilometers). All these processes are related to planetary surface, involving near-atmospheric pressure and low temperature (0 to 200°C). By analogy with the Earth, such environments are also favorable to the presence and development of life forms.

Over geological time on Earth, several opal deposits formed in horizons containing ancient biological remains (e.g. wood, plant roots and seeds, vertebrate skeletons, etc.) that have been preserved by the silicification process. In the case of wood, several studies shown that this process does not seem to preserve significant amounts of OM, but rather act as a silica cast (Mustoe, 2023). Moreover, in these cases OM has never been visualized or qualified *in-situ* by detection methods such as spectroscopy but only observed after HF treatment (St. John, 1927) or roughly estimated by loss-on-ignition experiments (Mustoe, 2016).

In another hand, some opals (predominantly black) that do not exhibit evidences of macroscopic fossils, display discreet infrared signatures characteristic of organic matter (OM) (Banerjee & Wenzel, 1999; Herrmann et al., 2019). Such samples may indicate the existence of another type

*Intervenant

†Auteur correspondant: simon.gouzy@univ-nantes.fr

of interaction between OM and opal, distinct from the petrification of the dead organisms.

In order to document and characterize this OM-silica relationship, we conducted a non-destructive, *in situ* investigation using Micro-FTIR and AFM-IR on two samples from distinct localities where OM was suspected: pink opals from Quincy, France (found in 35 Ma-old lacustrine limestone) and black opal from Volyn, Ukraine (found in 1.5Ga to 550 Ma-old weathered magmatic rocks).

The FTIR and Micro-FTIR analyses indicate the presence of OM in both samples. The Quincy pink opal spectra four well-defined peaks around 2855, 2880, 2930 and 2965 cm⁻¹ characteristic of the stretching vibration of s(CH₂), s(CH₃), as(CH₂), and as(CH₃). A spatial variations investigation show that the OM bond's signature varies positively with the intensity of the pink color. The spectra of Volyn black opal show only two well-defined peaks around 2855 and 2925 cm⁻¹, characteristic of s(CH₂) and as(CH₂) respectively. These signatures are present in all black opal spectra with a similar relative intensity, indicating a diffuse and homogeneous distribution through the sample.

Micrometer-scale IR maps combined to topography images, both acquired by AFM-IR, reveal that the organics are clustered and localized preferentially in the micro- to nano-pores, at the pore-silica matrix interface in both opals. This spatial distribution suggests that the OM was trapped during the formation and deposition of the opals, rather than during a later event. This is supported the strong ability of silicic and polysilicic acids to bond with OM through the hydroxyl groups in solution, which is considered as a preliminary step in the petrification process of wood through templating (Leo & Barghoorn, 1976; Mustoe, 2023).

All these elements suggest that two processes are involved for the incorporation of OM in opal: 1) The precipitation of silica, leading to opal formation, may serve as a segregator of OM within the fluids through hydrogen bonding. 2) The mechanical deposition of silica nanograins and aggregated structure may serve as a local accumulator of OM.

Therefore, these observations make opal a promising candidate for preserving pristine organic matter, possibly related to life, over geological timescales on Earth and other planetary bodies, such as Mars, that experienced liquid water on their surface.

References:

Banerjee, A., & Wenzel, T. (1999). Black opal from Honduras. *European Journal of Mineralogy*, 11(2), 401-408. <https://doi.org/10.1127/ejm/11/2/0401>

Herrmann, J. R., Maas, R., Rey, P. F., & Best, S. P. (2019). The nature and origin of pigments in black opal from Lightning Ridge, New South Wales, Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 66(7), 1027-1039. <https://doi.org/10.1080/08120099.2019.1587643>

Mustoe, G. E. (2016). Density and loss on ignition as indicators of the fossilization of silicified wood. *IAWA Journal*, 37(1), 98-111. <https://doi.org/10.1163/22941932-20160123>

Mustoe, G. E. (2023). Silicification of Wood: An Overview. *Minerals*, 13(2), 206. <https://doi.org/10.3390/min13020206>

Fractionnement des éléments réfractaires pendant l'accrétion

Tahar Hammouda ¹, Maud Boyet ^{*† 1}

¹ Laboratoire Magmas et Volcans – CNRS : UMR6524, OPGC, Université Clermont Auvergne, CNRS, IRD – France

Le comportement des éléments chimiques est relativement bien connu pour les conditions des processus magmatiques terrestres (température, pression et fugacité d'oxygène). Certains éléments réfractaires, caractérisés par des températures de condensation supérieures à 1250K, peuvent toutefois montrer des comportements très différents dans des conditions réduites (sous faible fugacité en oxygène). Ces comportements peuvent être étudiés en analysant les météorites formées en conditions réduites (par ex. chondrites à enstatite) et en réalisant des expériences en laboratoires. Des fractionnements importants au sein des éléments du groupe des terres rares (REE) sont observés dans les minéraux des chondrites à enstatite (Hammouda et al., 2022), dans certains chondres de chondrites ordinaires et chondrites à enstatite (Pack et al., 2004 ; Jacquet et al., 2015) et dans des inclusions réfractaires (Davis et al., 2018). On considère pourtant que ces éléments sont peu fractionnés par des processus de haute température.

Les REE sont principalement sous la forme 3+ dans les roches terrestres, sauf l'euprium (Eu) qui existe sous la forme 2+. Dans les chondrites à enstatite, des anomalies de concentration sont observées pour plusieurs REE, dont Eu, Yb et Sm. Afin de comprendre ces variations, nous avons déterminé la valence de l'Yb dans une collection de météorites formées dans différentes conditions de fugacité d'oxygène par XANES (Advanced Photon Source, Chicago). Dans toutes les chondrites à enstatite (EH et EL), environ la moitié de l'Yb est présent sous la forme 2+. Pour toutes les autres météorites (chondrite ordinaire, eucrite, pallasite, et achondrite NWA 11119), ainsi que pour les roches terrestres, l'Yb est présent uniquement sous forme 3+ (Hammouda et al., 2024). Ces résultats suggèrent que les sous-groupes des chondrites à enstatite (EH and EL) se forment dans des conditions redox similaires. Les différences de fractionnements observés dans les spectres de REE pour ces deux sous-groupes s'expliquent par des processus d'évaporation-condensation. Ainsi, les fractionnements des REE dans les matériaux planétaires révèlent une interaction entre la volatilité et l'état de valence.

Davis, A. M., Zhang, J., Greber, N. D., Hu, J., Tissot, F. L., & Dauphas, N. (2018). Titanium isotopes and rare earth patterns in CAIs: Evidence for thermal processing and gas-dust decoupling in the protoplanetary disk. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 221, 275-295.

Hammouda, T., Boyet, M., Frossard, P., & Cartier, C. (2022). The message of oldhamites from enstatite chondrites. *Progress in Earth and Planetary Science*, 9(1), 13.

Hammouda, T., Frossard, P., Boyet, M., Bouvier, A., Newville, M., & Lanzirotti, A. (2024).

*Intervenant

†Auteur correspondant: M.Boyet@opgc.univ-bpclermont.fr

Mapping the redox state of the young Solar System using ytterbium valence state. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 372, 124-133.

Jacquet, E., Alard, O., & Gounelle, M. (2015). The formation conditions of enstatite chondrites: Insights from trace element geochemistry of olivine-bearing chondrules in Sahara 97096 (EH 3). *Meteoritics & Planetary Science*, 50(9), 1624-1642.

Pack, A., Shelley, J. M. G., & Palme, H. (2004). Chondrules with peculiar REE patterns: Implications for solar nebular condensation at high C/O. *Science*, 303(5660), 997-1000.

The fO_2 of MORB glasses using a multi-proxy approach

Mikael Motte ^{*} ¹, Antoine Bezos ^{*}

², Maxime Lézin ², Carole La ², Christèle Guivel ²

¹ Laboratoire de Planétologie et Géosciences [UMR 6112] – Nantes Université, Univ Angers, Le Mans Université, CNRS – France

² Laboratoire de Planétologie et Géosciences
[UMR_C6112] – *NantesUniversité, UnivAngers, LeMansUniversité, CNRS, CNRS* :
UMR6112 – France

Oxygen fugacity (fO_2) is an intensive thermodynamic variable that reflects the chemical activity of oxygen in geological systems. The fO_2 plays a central role in the formation, differentiation and evolution of planetary interiors, surfaces, and atmospheres. Inferences on mantle's fO_2 are most commonly derived from the study of erupted magmas on planetary surfaces. The multivalent elements iron and vanadium occur in Earth's basaltic volcanism in multiple valence states. As a result, many oxybarometers based on the geochemistry of these two elements have been developed over the years (e.g., $Fe^{2+}/\sum Fe$, Dvol-melt, V/Sc, Zn/Fe). However, discrepancies in calculated fO_2 appear between these proxies when applied to earth magmas (MORB vs. arc). This study proposes the first multi-proxy approach to characterize the fO_2 of MORB magmas and aims to unravel the pros and cons of each studied oxybarometers. We selected 39 fresh MORB pillow lavas from the South West Indian Ridge (SWIR, N= 27) and other Pacific and Atlantic ridges (N=12). We measured the major and trace elements compositions of the glassy pillow rims, as well as 200 olivine microcrystals entrapped within these rims, using LA-ICP-MS. We also measured the $Fe^{2+}/\sum Fe$ ratio of glassy material by wet chemistry (direct titration method). The compositions of the melt phases range from 7 to 9.5 wt% for MgO, from 7.5 to 12 wt% for FeO, and from 144 to 392 ppm for V. Notably, some SWIR samples exhibit anomalously high Al₂O₃ (> 16%), being classified as high-Al basalts. In the context of low melt supply prevailing in the SWIR, such extreme enrichments in Al₂O₃ are believed to result from melt-rock reactions processes. The measured olivines, all displaying euhedral morphologies supporting equilibrium with the melt phases, range in compositions from Fo₉₀ to Fo₈₀, with vanadium contents ranging from 7 and 27 ppm, in agreement with scarce literature MORB data. This new dataset was used to compare iron and vanadium-based oxybarometers. The measured $Fe^{2+}/\sum Fe$, Dvol-melt, and V/Sc values encompass the whole range of variations reported for MORB literature data, with average values of 0.89 ± 0.01 , 0.04 ± 0.01 , and 5.96 ± 1.07 , respectively. The corresponding fO_2 averages, expressed relative to the QFM solid buffer, yielded comparable values of 0.65 ± 0.26 , 0.29 ± 0.32 , and 0.7 ± 0.46 , for $Fe^{2+}/\sum Fe$, Dvol-melt, and V/Sc, respectively. Most importantly, all fO_2 proxy investigated in this study display strong correlations with each other, suggesting that MORB fO_2 is not as homogeneous as previously thought. Therefore, we contend that the reported variations are meaningful, and that the fO_2 of MORB

*Intervenant

display heterogeneity of 1.15 log unit, with the peculiar occurrence of a particularly reduced end-member mostly seen in the SWIR samples (DQFM of -0.6). The investigated fO_2 proxies do not show significant correlations with proxies of fractional crystallization (MgO), degrees of partial melting (Na8.0) or source effects (La/Sm). Instead, they all tend to correlate with the Al_2O_3 contents suggesting that melt-rock reactions influence the MORB fO_2 in the context of low-melt supply ridges. We explored models of melt-rock reactions to identify the reducing mechanism involved in this shallow-level petrogenetic process.

Seismic signature of iron-sulfur melt pockets: from the micro-structures to the bulk elastic properties

Adrien Néri ^{*† 1,2}, Lianjie Man ³, Julien Chantel ⁴, Robert Farla ⁵, Tiziana Boffa Ballaran ³, Frost Daniel ³

¹ Unité Matériaux et Transformations - UMR 8207 – Centrale Lille, Université de Lille, Centre National de la Recherche Scientifique, Institut National de Recherche pour l’Agriculture, l’Alimentation et l’Environnement – France

² Bayerisches Geoinstitut, University of Bayreuth – Allemagne

³ Bayerisches Geoinstitut, University of Bayreuth – Allemagne

⁴ Unité Matériaux et Transformations - UMR 8207 – Centrale Lille, Université de Lille, Centre National de la Recherche Scientifique, Institut National de Recherche pour l’Agriculture, l’Alimentation et l’Environnement – France

⁵ Deutsches Elektronen-Synchrotron [Hamburg] – Allemagne

The Earth’s lithospheric mantle shows evidence for long-term low seismic wave-speed regions, often associated with mantle plumes or hot spots (e.g. 1). Locally raised temperatures or the presence of melts are typically invoked as explanations. However, some of these low-seismic velocity areas are located in old tectonic settings that do not show any evidence of surface activity for more than 60 Myr. Remnant thermal anomalies can be ruled out as they would have vanished over time, their lifetime is on the order of 10 Myr (2). Melt accumulations thus constitute the most likely explanation for such reduced wave-speeds. However, the melt has to remain immobile for more than 60 Myr, thus providing strong constraints on its nature.

Due to their low dihedral angles, silicate and carbonate melts (3) are poor candidates as they are likely to interconnect and migrate over such timescales. However, iron-rich metallic melts have larger dihedral angles and interconnection thresholds (4) and are thus more likely candidates. Besides their low melting temperature ensures their long-term persistence. Based on a geometric model, it has been proposed that up to 5 vol% of iron-sulfide melt would reproduce the observed wave-speed reductions up to 4 % (2). Such geometrical models assume that for crystal-melt mixtures the small-scale geometry, more precisely described by a parameter named "contiguity", controls the mixing law that predicts the wave velocities of the mixture. Contiguity is determined from the crystal-crystal boundary length compared to the total boundary length within the sample and is a function of the dihedral angle, grain size and melt volume fraction.

Very few experimental studies reported acoustic velocities of partially molten aggregates. The present study thus aims to investigate the effect of an isolated iron-sulfur melt on the acoustic properties of a solid aggregate. To do so, ultrasonic interferometry is used to determine the elastic wave velocities of mixtures of olivine and troilite (3 to 15 vol%). A series of experiments was conducted at the end-station beamline P61B of the synchrotron DESY (Deutsches Elektronen

*Intervenant

†Auteur correspondant: adrien.neri@univ-lille.fr

Synchrotron), using a 14/8 multi-anvil octahedral assembly. In this configuration, we were able to collect acoustic velocities data up to ≈ 14 GPa and 1800 K, which are conditions relevant to the context of the above-mentioned persistent seismic anomalies. The collected elastic wave velocity data are to be compared with existing literature data, and geometrical models based on contiguity (e.g. 5,6), as this parameter can be directly observed in recovered samples. Elastic-wave velocities indicate that ≈ 9 vol% of iron-sulfur melt is required to match the observed seismic anomalies. These melt fractions are in fairly good agreement with what is expected from contiguity measurements.

References

- (1) A. Lodge and G. Helffrich, *Geology* 34, 6 (2006)
- (2) G. Helffrich, J.-M. Kendall, J.O.S. Hammond and M.R. Carroll, *GRL* 38 (2011)
- (3) D. Laporte and A. Provost, *Physics and Chemistry of partially molten rocks* (2000)
- (4) G.F.D. Solferino, P.-R. Thomson and S. Hier-Majumder, *Front. Earth Sci.* 8 (2020)
- (5) Y. Takei, *JGR Solid Earth* 103 (1998)
- (6) Y. Takei, *JGR Solid Earth* 105 (2000)

Révision géophysique du diamètre du cratère d'impact Zhamanshin (Kazakhstan)

Yoann Quesnel * ¹, Jérôme Gattacceca ², Minoru Uehara ³

¹ Centre européen de recherche et d'enseignement des géosciences de l'environnement – Aix-Marseille Université - AMU, Centre National de la Recherche Scientifique - CNRS, Institut de recherche pour le développement [IRD], Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE) – France

² Centre européen de recherche et d'enseignement des géosciences de l'environnement – Aix-Marseille Université - AMU, Centre National de la Recherche Scientifique - CNRS, Institut de recherche pour le développement [IRD], Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE) – France

³ Centre européen de recherche et d'enseignement des géosciences de l'environnement – Aix-Marseille Université - AMU, Centre National de la Recherche Scientifique - CNRS, Institut de recherche pour le développement [IRD], Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE) – France

Plus de 200 impacts de météorites sont actuellement recensés sur Terre, avec une répartition assez hétérogène, en terme de densité, sur les continents. La répartition en gamme de taille de cratères est aussi un marqueur important du flux d'impact sur notre planète. Malheureusement, beaucoup de cratères d'impact ont perdu leur morphologie initiale par érosion et/ou enfouissement, pour devenir des structures d'impact. Tout l'enjeu est alors de réussir à caractériser le diamètre du cratère final (juste après l'impact) à partir de la morphologie et la structure profonde actuelles. Le cratère d'impact de Zhamanshin au Kazakhstan (âge = 1 Ma) est annoncé avec un diamètre entre 10 et 14 km, en se basant sur un demi-anneau de monts de roches d'âge Paléozoïque entourant une dépression centrale (Kenkmann, 2021). Nous proposons de réviser ce diamètre. En effet, par l'analyse de nouvelles mesures magnétiques, gravimétriques et sismiques sur toute la zone, nous démontrons que les anomalies géophysiques sont restreintes à la zone centrale de la dépression, pour un diamètre de seulement 6-7 km au maximum. Le cratère n'affleure pas : il est enfoui sous une couche de sédiments récents. Cette révision permet aussi d'affirmer que les verres d'impact appelés irghizites sont bien situés à l'extérieur du cratère, et non pas dans le cratère s'il faisait 14 km de diamètre, ce qui paraissait anormal par rapport à la théorie de leur retombée.

*Intervenant

Inclusions de phosphate de calcium et de grains reliques de platinoïdes dans des tectites du Laos et de Côte d'Ivoire : implications sur l'impact australasien et son cratère d'origine.

Pierre-Marie Zanetta ^{*† 1,2}, Anne-Magali Seydoux-Guillaume ¹, Pierre Rochette ², Bruno Reynard ³

¹ Laboratoire de Géologie de Lyon - Terre, Planètes, Environnement – UCBL, ENSL, CNRS, LGL-TPE – France

² Centre européen de recherche et d'enseignement des géosciences de l'environnement – UM 34
Université Aix Marseille-CNRS-IRD-Collège de France-INRAE – France

³ École normale supérieure de Lyon – UCBL, ENSL, CNRS, LGL-TPE – France

Les tectites sont des billes de verres réduites, issus de matériaux fondus et éjectés lors d'un impact de météorite sur Terre (1,2). Aujourd'hui il existe cinq champs de tectites connus. Le champ australasien est le plus jeune (789 ± 9 ka (3), une période où les premiers hominidés foulaient déjà la surface des continents) et le plus vaste (15 % de la surface du globe (4)). Malgré cela, il s'agit du seul champ de tectites n'ayant pas de cratère d'impact clairement associé (5,6). La difficulté pour identifier le cratère source et retracer l'histoire et le processus de formation de certaines tectites réside dans le fait qu'une grande majorité sont des verres globalement homogènes en composition. Les échantillons présumés proche du cratère source, connus sous le nom de Muong Nong (localité au Laos) présentent fréquemment des inclusions minérales dans le verre hôte. Ces inclusions sont une source d'informations importante sur le matériau d'origine, l'histoire thermique de l'échantillon et le processus de formation des tectites.

Un échantillon 8 fois plus magnétique que la moyenne des tectites australasiennes de type Muong Nong a révélé la présence d'inclusions de phosphate de calcium. Les microscopies optique, électronique à balayage (JEOL JSM-IT800SHL, laboratoire Hubert Curien) et électronique en transmission (S/TEM NeoARM200F de 200 kV géré par le CLYM) ont été combinées pour analyser cet échantillon. Ces résultats sont comparés à une tectite de Côte d'Ivoire qui présente également des inclusions de phosphate de calcium et dont le matériau d'origine est bien connu (7).

Les inclusions présentes dans la tectite australasienne sont majoritairement des lechatelierite (SiO_2 pur) et des grains d'apatite sphériques. L'échantillon présente aussi des inclusions complexes constituées d'un assemblage d'apatite, de magnétite, de pyroxène et de spinelle dendritique, qui se développent à partir d'un grain de platinoïde. Les spinelles présentent une variation de composition et de $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$. Le grain de platinoïde est pauvre en Ir, mais riche en Ru et Rh. Cette composition diffère des grains de platinoïdes retrouvés dans les météorites. La coalescence des inclusions en forme de gouttelettes suggère la formation d'un liquide immiscible à partir de grains détritiques. Les profils de diffusion autour des lechatelierite montre que le matériel a

*Intervenant

†Auteur correspondant: pierre.marie.zanetta@gmail.com

été chauffé à haute température ($> 2200^{\circ}\text{C}$, (8)), très brièvement (quelques secondes), ce qui a permis de figer les textures d'émulsion.

La faible concentration en phosphore dans le sédiment d'origine des tectites de côte d'Ivoire suggère que ces inclusions sont héritées de la partie superficielle du matériel impacté ; le sol et sa biomasse. Le processus de réduction que les tectites enregistrent peut alors s'expliquer par la masse importante de carbone contenue dans les forêts (gradient $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ dans les spinelles). La composition du grain de platinoïde déterminée par une méthode plus précise comme la sonde atomique tomographique pourrait permettre de tracer le cratère source des australasites.

References: (1) V.E. Barnes, (1961) *Scientific American* 205, 58–65. (2) P. Rochette et al. (2015), *Earth and Planetary Science Letters* 432, 381–390. (3) F. Jourdan, et al. (2019), *Meteoritics & Planetary Science* 54, 2573–2591. (4) L. Folco, et al. (2008), *Geology* 36, 291–294. (5) K. Sieh, et al. (2020), *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 117, 346–353. (6) J. Mizera, et al (2022), *Special Paper of the Geological Society of America* 553, 323–334. (7) C. Koeberl, et al. (1998), *Geochimica et Cosmochimica Acta* 62, 2179–2196. (8) C.A. Macris, et al. (2018), *Geochimica et Cosmochimica Acta* 241, 69–94.

Pluto and Charon observed with JWST

Tanguy Bertrand ^{*†} ¹, Emmanuel Lellouch , Bryan Holler , John Stansberry , Xi Wong , Linfeng Wan , Panayotis Lavvas , Frederic Merlin , Geronimo Villanueva , Noemi Pinilla-Alonso , Ana Carolina De Sousa Feliciano , Katherine Murray

¹ Pôle Planétologie du LESIA – CNRS – France

Pluto and its largest moon Charon display a variety of surfaces, whose thermal and energetic properties are largely unknown. Previous thermal measurements of the Pluto-Charon system yield multiple solutions because most of them did not resolve Pluto from Charon. In addition, recent modeling studies suggest that the atmospheric haze of Pluto could significantly contribute to its mid-infrared emission, thus adding further degeneracy. In October 2022, we measured Pluto and Charon separate thermal light curves over 15-25.5 μm with the JWST/MIRI instrument (6 visits, 4 filters - F1550W, F1800W, F2100W, F2550W), in the context of our accepted JWST GO-1 program (#1658) dedicated to the study of Pluto's climate system. At the meeting, we will present the results of the analysis of these observations. These include the retrieval of the thermophysical and emissivity properties of the different terrains and new constraints on thermal emission of Pluto's haze. Our results have implications on (1) the impact of the haze on Pluto's atmospheric temperatures and its climate at a global scale, (2) seasonal volatile transport on Pluto and (3) the formation of the red poles on Charon.

*Intervenant

†Auteur correspondant: tanguy.bertrand@obspm.fr

Seafloor hydrothermal control of ocean dynamics in Enceladus

Mathieu Bouffard ^{* 1}, Gaël Choblet ¹, Hagay Amit ¹, Gabriel Tobie ¹,
Ondrej Cadek ², Filipe Terra-Nova ¹

¹ Laboratoire de Planétologie et Géosciences

[UMR_C6112] – –*CNRS, NantesUniversit, CNRS : UMR6112 – –France*

² Charles University, Faculty of Mathematics and Physics, Department of Geophysics [Prague] –
République tchèque

Cassini observations imply a global ocean underneath Enceladus' ice shell, with hydrothermal seafloor activity. Previous numerical simulations showed that convection in Enceladus' unconsolidated core produces heterogeneous seafloor heat flux explaining the South Pole ice thinning and plume activity. While there is evidence for efficient hydrothermal transport from the seafloor to the plumes, the ocean dynamics is strongly debated. Here, we perform 3-D numerical simulations of the ocean with a very heterogeneous bottom boundary condition from 3-D hydrothermal core simulations. We show that a strong zonal flow inhibits low-latitudes heat transfer while it remains efficient in polar regions, which explains the ice shell variations derived from gravity and topography observations. Using passive tracers, we predict rising times of hours to weeks, compatible with previous predictions. Our simulations confirm that a strong heterogeneous seafloor heat flux concentrates upwellings at the South Pole, efficiently transporting potential bio-signatures from hydrothermal vents to erupting plumes.

*Intervenant

Hydrodynamique capillaire extraterrestre

Daniel Cordier * ¹, Gérard Liger-Belair ², David Bonhommeau ³, Thomas Séon ⁴, Thomas Appéré ⁵, Nathalie Carrasco ⁶

¹ Groupe de spectrométrie moléculaire et atmosphérique – CNRS – France

² Groupe de spectrométrie moléculaire et atmosphérique – CNRS – France

³ Laboratoire Analyse, Modélisation et Matériaux pour la Biologie et l'Environnement – CNRS – France

⁴ Institut Jean Le Rond d'Alembert – CNRS – France

⁵ Lycée Saint-Paul, Vannes – CNRS – France

⁶ Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales – CNRS – France

Ces dernières décennies ont vu l'émergence d'une nouvelle classe d'objets : les " mondes océan " abritant très probablement une quantité massive d'eau liquide. Les exemples les plus emblématiques sont sans doute Encelade et Titan. Dans le cas de ce dernier, la mission Cassini/Huygens a de plus mis en évidence l'existence de mers d'hydrocarbures. Les phases liquides, en tant que telles, présentent un intérêt géophysique via leur participation aux cycles de matière. Elles sont également singulières dans une perspective exobiologique, en effet avec leur densité, bien supérieure à celle des phases vapeurs, autorise des interactions fréquentes entre molécules dissoutes, ceci avec une mobilité plus grande que celle des phases solides. A suffisamment petite échelle, les interfaces liquide/vapeur ont des propriétés hydrodynamiques particulières qu'on peut regrouper sous le terme de " phénomènes de capillarité ". Ces propriétés dépendent de la nature du liquide à l'œuvre ainsi que de la gravité ambiante, ce qui justifie une discussion scientifique des possibles implications planétologiques. Au cours de cette étude, nous avons apporté une attention particulière au cycle hydrologique de Titan ainsi qu'à l'origine des microcristaux de glace observés dans les geysers d'Encelade.

Référence : Cordier *et al.* (2024)

<https://doi.org/10.1029/2023JE008248>

<https://arxiv.org/abs/2404.19131>

*Intervenant

Density of carbonaceous organic matter in icy bodies

Camille Delarue ^{*} ¹, Bruno Reynard ², Christophe Sotin ³

¹ Laboratoire de Géologie de Lyon - Terre, Planètes, Environnement [Lyon] – Université Claude Bernard - Lyon I, École Normale Supérieure - Lyon, CNRS – France

² Laboratoire de Géologie de Lyon - Terre, Planètes, Environnement [Lyon] – Université Claude Bernard Lyon 1, École Normale Supérieure - Lyon, CNRS : UMR5276 – France

³ LPG Nantes – UMR6112 – France

Carbonaceous organic matter (COM), between 20 and 50%, is needed to model the rocky core of icy bodies (Neri et al, 2020, Reynard & Sotin, 2023), and account for their mass, moment of inertia, and density as measured by the Cassini, Galileo and Juno missions. However, the effects of temperature and pressure on COM at conditions of the rocky cores (up to ~ 7 GPa and 1300 K) have not been taken into account in these preliminary models. We present an experimental characterization of the evolution of COM at elevated temperature and pressure to describe its density evolution during thermal evolution of icy bodies. Carbonaceous organic matter undergoes important transformations both in terms of composition and structure when subjected to an increase in temperature and pressure. These transformations are characterized by the loss of heteroatoms (O, H, N, S) and a structural rearrangement which lead to a variation of density from 1200 kg/m³ at 300 K to 2300kg/m³ at 1300 K.

We first performed determinations of the ambient temperature compressibility of COM analogs using diamond anvil cell experiments. Kerogens and glassy carbons were used as analogs of COM. Second, we adapted the Vitrimat kinetic model of kerogen chemical and density evolution as a function of temperature and time (Burnham 2019). This modification accounts for chemical evolution determined on samples heated at temperatures of 473-723 K for times ranging from seconds to 100 days, and at various pressures (0.2-2.5 GPa). Combining these two studies allows us to describe the density evolution of COM as a function of time, temperature and pressure, assuming it behaves like kerogens.

Thermo-chemical evolution models are coupled with this equation to determine the time evolution of the density structure of icy bodies and compare it with available observations. In addition to density evolution of COM in the core, heteroatoms are released as volatiles (mainly H₂O, CO₂, CH₄). They may form new species in the core (carbonates) and the high-pressure ice level (clathrates), reach the ocean, and be released to the upper ice level, then to space. Models will also provide estimates of volatile fluxes and formation of new compounds on the density structure.

Improvements of density determinations of COM analogs will provide accurate models for predicting the density and thermal evolutions compatible improved determinations of internal structures of icy moons from the JUICE and future Europa Clipper and Dragonfly missions, and observation of dwarf planets by JWST.

*Intervenant

Burnham, A. K. Kinetic models of vitrinite, kerogen, and bitumen reflectance. *Organic Geochemistry* **131**, 50-59 (2019). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2019.03.007>

Néri, A., Guyot, F., Reynard, B. & Sotin, C. A carbonaceous chondrite and cometary origin for icy moons of Jupiter and Saturn. *Earth and Planetary Science Letters* **530**, 115920 (2020). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.115920>

Reynard, B. & Sotin, C. Carbon-rich icy moons and dwarf planets. *Earth and Planetary Science Letters* **612**, 118172 (2023). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.epsl.2023.118172>

Mécanismes de désorption, de piégeage, de formation et dissociation de sels, d'échanges isotopiques des molécules constituant les glaces astrophysiques

François Dulieu * ¹

¹ LERMA – Observatoire de Paris, Université de Cergy Pontoise – France

Depuis plusieurs années notre équipe étudie expérimentalement la façon dont se forment et évoluent les films moléculaires sur des surfaces d'intérêt astrophysique, ainsi que leur retour en phase gazeuse. Les applications vont de la formation des molécules (eau, CO₂, molécules complexes) dans les environnements froids tels que les cœurs pré-stellaires ou les zones sombres des disques protoplanétaires, à leur sublimation pour des applications cométaires ou des sublimations induites (chocs, cœur stellaires) et/ou des environnements planétaires (froids).

Les processus de piégeage des molécules plus volatiles, le rôle de la glace d'eau dans ce mécanisme, et le rôle d'autres molécules tel que l'ammoniac et le CO₂ a été revisité récemment, notamment en regard de la découverte des sels dans la comète 67P et dans l'inventaire des glaces interstellaires par le JWST.

Nous souhaitons montrer au travers de quelques expériences emblématiques, quelles sont les différences entre les glaces pures et les glaces composites, et si cela a du sens de définir ou non une ligne glace pour chaque molécule. En d'autres termes, les molécules désorbent-elles indépendamment de la composition des manteaux moléculaires, ou tout est-il libéré lors de la sublimation des glaces ?

Dans ce contexte, la formation et la décomposition des sels suivis de leur sublimation, change profondément les températures de sublimations. Certaines molécules volatiles comme CO₂ et NH₃ peuvent se maintenir à des températures deux fois plus élevées. Nous verrons également que le processus de formation et séparation des sels change considérablement les rapports isotopiques (H/D) des constituants de la glace.

Enfin si l'on ajoute des molécules hétérogènes lors de la formation de la glace d'eau, on introduit des lacunes qui sont autant de possibilités pour des gaz volatils de s'échapper de la matrice d'eau, et limitent sa capacité de piégeage.

*Intervenant

After New Horizons, a new Pluto Climate Model for new challenges

Aurélien Falco ^{*† 1}, Tanguy Bertrand ², Francois Forget ¹, Ehouarn Millour ¹, Benjamin Charnay ³, Bruno De Batz De Trenquelléon ⁴

¹ Laboratoire de Météorologie Dynamique (UMR 8539) – CNRS – France

² Pôle Planétologie du LESIA – CNRS – France

³ Pôle Planétologie du LESIA – CNRS – France

⁴ Laboratoire de Météorologie Dynamique (UMR 8539) – CNRS – France

Nine years after Pluto’s flyby by New Horizons, there are still fundamental unanswered questions about Pluto’s atmosphere. Here we focus on two specific plutonian mysteries. First, New Horizons revealed thin wave-like structures at global scales in the atmosphere, consistent with density perturbations previously seen in stellar occultations. It remains unclear whether these waves are orographic gravity waves initiated from winds flowing over Pluto’s extensive topography or thermal tides resulting from the ”breathing” of N₂ ice in response to solar forcing. In addition, the impact of these waves on their climate has not yet been explored. Second, Pluto’s atmospheric thermal structure is presenting puzzling features such as: (1) a strong negative gradient between the stratosphere at 110K and the upper atmosphere at 70K, (2) a strong thermal gradient in latitude, still unexplained, and (3) a 3km-deep cold layer, which has been only partially explained. Recent studies suggest that the cooling of the upper atmosphere (1) may be explained by the presence of hazes. However the bulk material of the haze (organic vs ice) remains unclear, and the radiative impact of the haze on the atmosphere remains to be explored in detail with 3D climate models including haze and hydrocarbon ice microphysics, and tested against available thermal emission measurements of the atmosphere.

To tackle these scientific investigations, we created a completely new-generation planetary climate model (PCM) able to simulate Pluto at high spatial resolution, with haze microphysics processes, and over the long annual timescales. This Pluto PCM is derived from the LMD Generic PCM and from the Legacy Pluto GCM (Bertrand et al., 2020) and therefore benefits from the recent developments from the Generic PCM such as its efficient parallelization.

At the conference we will present this new tool and preliminary results regarding the impact of radiatively active hazes on Pluto’s climate as well as the propagation of gravity waves in the atmosphere.

*Intervenant

†Auteur correspondant: aurelien.falco@lmd.ipsl.fr

The composition of the dust particles of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko suggests a pre-accretionary irradiated surface composition

Nicolas Fray* ¹, Hervé Cottin ^{† 2}, Inès Sansberro , Martin Hilchenbach , Oliver Stenzel , Henning Fisher , John Paquette , Cécile Engrand , Donia Baklouti ³, Christelle Briois ⁴, Laurent Thirkell ⁵, Anais Bardyn , Jouni Ryno , Klaus Hornung ⁶

¹ LISA – CNRS : UMR7583, Université Paris-Est Créteil Val-de-Marne (UPEC), Université Paris Cité – France

² LISA – Université Paris-Est Créteil Val-de-Marne (UPEC), Université Paris Cité, CNRS – France

³ Institut d’astrophysique spatiale – Université Paris-Sud - Paris 11, Institut national des sciences de l’Univers, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR8617, Institut national des sciences de l’Univers – France

⁴ Laboratoire de Physique et Chimie de l’Environnement et de l’Espace – CNRS : UMR7328 – 3A, Avenue de la Recherche Scientifique 45071 Orléans cedex 2, France

⁵ Laboratoire de Physique et Chimie de l’Environnement et de l’Espace – Centre National de la Recherche Scientifique : UMR7328 – 3A, Avenue de la Recherche Scientifique 45071 Orléans cedex 2, France

⁶ Universität der Bundeswehr München [Neubiberg] – Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg, Allemagne

Comets formed in the solar nebula more than 4.5 billion years ago. Due to their small size and storage in the outer region of the Solar System, they have not (or barely) evolved since then. Therefore, they are small bodies whose composition provides important clues about the conditions and processes at stake during the formation of the Solar System. This idea has been confirmed by the first measurements of dust particles during the ROSETTA mission by the COSIMA mass spectrometer. These measurements revealed dust particles with a composition testifying that they did not experience any significant differentiation or aqueous alteration and had a composition close to Solar values, even strongly enriched in carbon compared to carbonaceous chondrites. However, anomalies regarding the abundance of elements such as Mg were observed (Bardyn et al., 2017). The particles ejected from the nucleus of comet 67P-Churyumov-Gerasimenko and collected by the COSIMA instrument are still the subject of an in-depth study

*Auteur correspondant: nicolas.fray@lisa.ipsl.fr

[†]Intervenant

of their elemental composition. This work aims to characterize the elemental composition of each particle one by one for most of the usable data acquired during the mission, with a systematic methodology for each element on each particle. We address in this work the elemental relative composition in H, C, Na, Mg, Si, and Fe for 59 individual analyses and additionally for Al, K, and Ca on a smaller subset of 14 analyses due to quantification constraints. We have also interpreted measurements performed after a sputtering process prior to composition analysis, revealing for the first time the nature of the subsurface of 67P's dust particles. Our results confirm the high organic content already revealed by the first analyses, but we can also discuss the variability of composition within our data set in more detail. Data reveal that surface and subsurface compositions differ. We also show that the dust particles are made of subunits (constituents) whose surface composition has kept the signature of an irradiation process before their accretion into the particles themselves and, later, into the nucleus of Comet 67P. We will discuss whether this pre-accretional irradiation could have occurred in the interstellar medium before our natal molecular cloud collapsed, or rather in the inner regions of the Solar nebula.

The Comet Interceptor mission

Pierre Henri ^{*† 1,2}, Nicolas André ³, Philippe Garnier ³, Olivier Groussin ⁴,
Aurélie Guilbert-Lepoutre ⁵

¹ Lagrange – Observatoire de la Cote d’Azur, CNRS : UMR7293, Université Côte d’Azur (UCA) – France

² LPC2E – CNRS : UMR7328, Université d’Orléans, CNES, OSUC, Université d’Orléans – France

³ Institut de recherche en astrophysique et planétologie – Institut National des Sciences de l’Univers : UMR5277, Université Toulouse III - Paul Sabatier, Observatoire Midi-Pyrénées, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR5277, Institut National des Sciences de l’Univers, Centre National de la Recherche Scientifique – France

⁴ Laboratoire d’Astrophysique de Marseille – Aix Marseille Université, Institut National des Sciences de l’Univers, Centre National de la Recherche Scientifique – France

⁵ Université Claude Bernard Lyon1, LGL-TPE, UMR-5276 CNRS – Université Claude Bernard - Lyon I, LGL-TPE (Laboratoire de Géologie de Lyon : Terre, Planètes, Environnement) – France

Comet Interceptor is the first Fast (F-class) mission in ESA’s Cosmic Vision program, developed in cooperation with JAXA. The Comet Interceptor mission innovates on several levels: it is the first ESA rapid response mission, the first mission to a long-period comet or an interstellar object, and the first multipoint investigation of a comet with three spacecraft. Indeed, it will be the first mission to visit a ‘dynamically new’ object, as it journeys into the inner Solar System, which contains pristine material from the very dawn of the Solar System.

The Comet Interceptor mission consists of three spacecraft that will be launched in 2029 and wait at the Lagrange point L2. Once a suitable target is identified, Comet Interceptor will travel to an as-yet-undiscovered comet and complete a flyby. Its three spacecraft will perform simultaneous observations from multiple points around the comet to provide measurements on the surface composition, shape, morphology, and structure of the target object nucleus, as well as on the composition of its coma, its connection to the nucleus (activity) and on the nature of its interaction with the Sun and the solar wind.

We will describe the Comet Interceptor mission, its objectives, the working groups that are currently supporting the development of the instruments and the target selection procedure, and highlight the various contributions from French laboratories.

*Intervenant

†Auteur correspondant: pierre.henri@cns-orleans.fr

Cohesive properties of ice powders and mixtures as analogues of regoliths of icy worlds

Benoît Jabaud ^{*† 1}, Noé Le Becq ², Riccardo Artoni ³, Gabriel Tobie ²,
Erwan Le Menn ⁴, Susan Conway ⁵, Patrick Richard ⁶

¹ Laboratoire de Planétologie et Géosciences [UMR_C6112] –
–*LeMansUniversit, Universitd' Angers, InstitutNationaldesSciencesdel'Univers, CentreNationaldelaRechercheScie*
UFRdesSciencesetdesTechniques – –2RuedelaHoussinire –
BP9220844322NANTESCEDEX3, France

² Laboratoire de Planétologie et Géosciences [UMR_C6112] –
–*LeMansUniversit, Universitd' Angers, InstitutNationaldesSciencesdel'Univers, CentreNationaldelaRechercheScie*
UFRdesSciencesetdesTechniques – –France

³ Université Gustave Eiffel, MAST, GPEM, F-44344 Bouguenais, France – Université Gustave Eiffel –
France

⁴ Laboratoire de Planétologie et Géosciences [UMR_C6112] –
–*LeMansUniversit, Universitd' Angers, InstitutNationaldesSciencesdel'Univers, CentreNationaldelaRechercheScie*
UFRdesSciencesetdesTechniques – –2RuedelaHoussinire –
BP9220844322NANTESCEDEX3, France

⁵ Laboratoire de Planétologie et Géosciences
[UMR_C6112] – –*NantesUniversit, UnivAngers, LeMansUniversit, CNRS, CNRS :*
UMR6112 – –France

⁶ Université Gustave Eiffel, MAST, GPEM, F-44344 Bouguenais, France – Université Gustave Eiffel –
France

Many planetary bodies in the Solar System are likely covered with a surface regolith of water ice powder, potentially mixed with a variety of other compounds. For example, on Enceladus jet activity results in the deposition of very fine ice grains ($\sim 10\text{-}100\mu\text{m}$) at low temperature ($\sim 70\text{K}$) suggesting the formation of relatively stable powdery deposits (Choukroun et al., 2020). Similar processes involving salts could also be active on Europa (Roth et al., 2014). Ceres also potentially has a mixture of ice and rocky powder materials at its surface (De Sanctis et al., 2015). The mechanical behavior of ice powders at low temperatures relevant to these bodies is poorly constrained and mixed ice powders could further change their behavior. Hence, characterizing the properties of these powders is essential for understanding the evolution of the surface and the technical aspects of future missions involving landing and/or sampling of surface materials. In the laboratory, we synthesize pure ice powders, salty ice and rock-ice mixture powders to produce analogues of different icy regoliths. To analyze the mechanical behavior of our samples, we developed a 64mm diameter liquid-nitrogen cooled rotating drum to perform measurements under very low temperatures. The cohesion of the icy powders is quantified by analyzing the angle and irregularities of the flowing surface inside the drum (Lumay et al., 2012) over a wide range of temperatures ($\sim 85\text{-}180\text{K}$). Each measurement consists in 5 rotation speeds for each temperature step, with many images acquired for each speed from which we compute the mean angle of the flowing surface.

*Intervenant

†Auteur correspondant: benoit.jabaud@univ-nantes.fr

Our measurements of pure water ice powder show that its cohesion greatly increases with temperature, an effect not observed in any other material. At around 90K the ice powder behaves similarly to weakly-cohesive glass beads, while at 140K it behaves more like a cohesive limestone powder. Our preliminary results for salty ice powders show a weaker cohesion, probably due to the presence of salt in the grains. Higher salt concentrations could lead to different cohesive behavior, maybe because of the formation of a salt crust around the grains. First results for mixtures of ice and glass beads show contrasting trends with temperature depending on the proportion of ice in the mixture. Below 54%, the overall cohesion increases, but no temperature dependence is observed. Whereas with $> 54\%$ ice the trend of increasing cohesion with the temperature is again observed. The influence of temperature and ice fraction on the cohesiveness of such powders could lead to temporally (day/night temperature cycles) and spatially (compositional variations across the surface) changing the mechanical stability of icy regoliths, leading to easier destabilization of the icy material. This could explain the observation of downslope flow morphologies observed on a variety of icy surfaces.

References :

Lumay, G., Boschini, F., Traina, K., Bontempi, S., Remy, J.-C., Cloots, R., et Vandewalle, N. Measuring the flowing properties of powders and grains. *Powder Technology*, 224 : 19–27, jul 2012. doi : 10.1016/j.powtec.2012.02.015.

Choukroun, M., Molaro, J. L., Hodyss, R., Marteau, E., Backes, P., Carey, E. M., Dhaouadi, W., Moreland, S., et Schulson, E. M. Strength Evolution of Ice Plume Deposit Analogs of Enceladus and Europa. *Geophysical Research Letters*, 47(15), 2020. ISSN 0094-8276. doi : 10.1029/2020gl088953.

Roth, L., Saur, J., Retherford, K. D., Strobel, D. F., Feldman, P. D., McGrath, M. A., et Nimmo, F. Transient Water Vapor at Europa's South Pole. *Science*, 343 :171–174, 2014. ISSN 0036-8075. Doi 10.1126/science.1247051.

De Sanctis, M. C., Ammannito, E., Raponi, A., Marchi, S., McCord, T. B., McSween, H. Y., Capaccioni, F., Capria, M. T., Carrozzo, F. G., Ciarniello, M., Longobardo, A., Tosi, F., Fonte, S., Formisano, M., Frigeri, A., Giardino, M., Magni, G., Palomba, E., Turrini, D., Zambon, F., Combe, J.-P., Feldman, W., Jaumann, R., McFadden, L. A., Pieters, C. M., Prettyman, T., Toplis, M., Raymond, C. A., et Russell, C. T. Ammoniated phyllosilicates with a likely outer Solar System origin on (1) Ceres. *Nature*, 528(7581) :241–244, dec 2015. doi : 10.1038/nature16172.

Impact of melt accumulation on tidal heat production in Europa's mantle

Mathilde Kervazo ^{*† 1}, Marie Behoukova ², Gabriel Tobie ¹, Gaël Choblet ¹, Caroline Dumoulin ¹

¹ Laboratoire de Planétologie et Géosciences [LPG UMR 6112] – Nantes université - UFR des Sciences et des Techniques, Univ Angers, Le Mans Université, CNRS, CNRS : UMR6112 – France

² Charles University – KG MFF UK, V Holešovičkách 2, 180 00 Praha 8, République tchèque

Volcanic activity at Europa's seafloor is one of the key question regarding the habitability of its subsurface ocean. The suitable conditions for hydrothermalism on Europa's seafloor are conditioned by the heat released from the underlying silicate mantle, either supplied by both radiogenic and tidal heating. The orbital resonance between Io, Europa, and Ganymede forces their orbit and maintain nonzero eccentricities. As a consequence, Io, and to a lesser extent, Europa, undergo large tidal forcing during their journey around Jupiter. Because of its greater distance from Jupiter, a smaller mantle size and the decoupling effect due to the presence of the subsurface water ocean (1), mechanical energy produced by tides in Europa's mantle is much less than that produced within Io (1, 2). However, as demonstrated by the 3D approach of Běhouková et al. (3), the combination of tidal and radiogenic heating could maintain a partially molten state within Europa's mantle for several tens to hundred millions of years, particularly during periods of increased eccentricity (4). Due to inefficient melt transport through the thick lithosphere of Europa (5), melt produced during periods of enhanced eccentricity may accumulate and in turn affect the tidal heating, as it is the case for Io (e.g. 6), implying a possible runaway melt process in the silicate interior of Europa. In this context, the goal of this study is to evaluate the effect of melt accumulation on Europa's mantle tidal heat production, based on the predictions from the 3D simulations of Běhouková et al. (3). For that purpose, we follow the approach developed to model the solid tides in Io's partially molten interior (6), taking into account the effect of melt on the viscoelastic properties of the mantle. We adapt

*Intervenant

†Auteur correspondant: mathilde.kervazo@gmail.com

it to the context of Europa, corresponding to a deeper asthenosphere than on Io. We use the 3D model of Běhounková et al. (3) to assess in a manner consistent with mantle dynamics the depths where melting should occur as well as the production rates, which should be seen here as minimum values, and estimate the effect of melt accumulation in Europa's mantle on local dissipation rate and re-assess the consequences in terms of global melt production rate.

Based on the production rates predicted by Běhounková et al. (3), a 100 km thick layer with a melt fraction of 20% would form in 140 million years. In order to evaluate the impact of such an accumulation zone of melt, we considered different thicknesses of partially molten layers (25, 50, 100, 200 km), plated at the base of the lithosphere, and investigate melt fraction from 0 to 30 %, corresponding to different degrees of accumulation of melt products. We show that, whatever the partially molten layer thickness, melt accumulation increase tidal heat production and even exceed radiogenic heating. For equivalent volume of accumulated melt, the thinner the layer, the more pronounced this effect is.

Our results show that the accumulation of melt, over timescales consistent with the 3D model prediction of Běhounková et al. (3), may significantly affect the tidal dissipation amplitude and its pattern. The potential presence fo such melt accumulations may be tested by future measurements by Europa Clipper and JUICE from the combined analysis of gravimetric, altimetric and magnetic data, which might reveal long-wavelength anomalies which could be confronted to our model prediction.

References : (1) Tobie, G. et al., *Icarus* (2005). (2) Sotin, C. et al. *Europa* (2009). (3) Běhounková et al., *GRL* (2021). (4) Hussmann and Spohn , *Icarus* (2004). (5) Bland and Elder, *GRL* (2022). (6) Kervazo et al., *A&A* (2021).

Nouveau modèle de dégradation des cratères d'impact sur Cérès : sublimation de la glace et formation de talus.

Noé Le Becq * ¹, Susan Conway ¹, Benoît Jabaud ^{1,2}, Gabriel Tobie ¹,
Riccardo Artoni ²

¹ Laboratoire de Planétologie et Géosciences – Nantes Université, Univ Angers, Le Mans Université, CNRS, CNRS : UMR6112 – France

² MAST/GPEM – Université Gustave Eiffel – France

Cérès est le plus gros corps de la ceinture principale d'astéroïdes et a une faible densité - environ 2150 kg/m³- comparée aux astéroïdes voisins. La planète naine se serait formée dans les régions froides du Système Solaire (SS) externe, avant d'être capturée vers l'intérieur du SS lors de la migration de Jupiter (Coradini et al., 2011 ; Ribeiro de Sousa et al., 2022), ce qui en fait une cible d'exploration spatiale unique (Committee on the Planetary Science and Astrobiology Decadal Survey et al., 2022).

L'analyse des données de la sonde NASA Dawn a révélé la nature différenciée de Cérès, avec une croûte superficielle riche en glace d'eau recouvrant un possible océan d'eau liquide et un noyau rocheux (Ermakov et al., 2017 ; Neumann et al., 2020). La mission Dawn a par ailleurs révélé la nature complexe de la surface, détectant de nombreux minéraux hydratés (De Sanctis et al., 2015 ; Zambon et al., 2017 ; Stein et al., 2019), et des morphologies attestant d'une activité géologique récente, voire active, liée aux volatiles (Sizemore et al., 2019 ; Scully et al., 2020). En effet, on estime aujourd'hui la teneur en glace d'eau de la croûte entre 20 et 40 vol% (Prettyman et al., 2017 ; Chilton et al., 2019).

Ici, nous explorons la dégradation des cratères d'impact à la surface de la planète naine afin de comprendre le rôle de la sublimation de la glace dans l'évolution de leur morphologie. Nous avons observé des dépôts de talus sur les remparts de nombreux cratères. Les talus sont des morphologies associées à la dégradation d'un matériel cohésif en haut de pente, qui vient nourrir des cônes d'éboulis en contrebas. Nous avons cartographié 324 talus à la surface de Cérès, associés à plus de 5500 affleurements, répartis dans 180 cratères, de tailles (5 à 200 km de diamètre) et d'âges (2 Ma à plusieurs centaines de Ma) variés. Nous avons aussi montré que les remparts faisant face aux pôles ont des talus 18 % plus étendus et comprennent plus de 75 % des affleurements cartographiés. Les talus situés face aux pôles ont également un angle de pente 5° plus élevé que ceux faisant face à l'équateur.

La prépondérance des talus à la surface de Cérès est plutôt inattendue puisque le processus prédominant de dégradation des cratères sur un objet sans atmosphère aurait dû être la diffusion topographique, comme observée sur la Lune ou Mercure (Ross, 1968; Soderblom, 1970; Fassett and Thomson, 2014). Nos observations suggèrent que la glace d'eau a un rôle important dans

*Intervenant

la dégradation des cratères. Nous proposons que les affleurements soient riches en glace et que la sublimation de cette dernière provoque leur fragmentation, fournissant les débris peu cohésifs à l'origine des talus. Le taux de sublimation dépendant des conditions d'insolation, cela expliquerait la plus grande taille des talus, et la présence d'un plus grand nombre d'affleurement sur les pentes les moins exposées. La formation de talus liée à la sublimation de la glace est probablement le processus de dégradation prédominant à la surface de Cérès pendant les premières dizaines de millions d'années après l'impact, surpassant l'effet de la diffusion topographique. Ce processus, qui mène au retrait progressif des remparts à mesure que les affleurements se dégradent, augmente alors le diamètre des cratères au fil du temps, et pourrait avoir une influence sur les estimations d'âge à la surface de Cérès.

Références :

Chilton, H. T. et al. Landslides on Ceres: Inferences Into Ice Content and Layering in the Upper Crust. *Journal of Geophysical Research: Planets* 124, 1512–1524 (2019).

Committee on the Planetary Science and Astrobiology Decadal Survey, Space Studies Board, Division on Engineering and Physical Sciences, & National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. *Origins, Worlds, and Life: A Decadal Strategy for Planetary Science and Astrobiology 2023-2032*. 26522 (National Academies Press, Washington, D.C., 2022). doi:10.17226/26522.

Coradini, A., Turrini, D., Federico, C. & Magni, G. Vesta and Ceres: Crossing the History of the Solar System. *Space Sci Rev* 163, 25–40 (2011).

De Sanctis, M. C. et al. Ammoniated phyllosilicates with a likely outer Solar System origin on (1) Ceres. *Nature* 528, 241–244 (2015).

Ermakov, A. I. et al. Constraints on Ceres' Internal Structure and Evolution From Its Shape and Gravity Measured by the Dawn Spacecraft. *Journal of Geophysical Research: Planets* 122, 2267–2293 (2017).

Fassett, C. I. & Thomson, B. J. Crater degradation on the lunar maria: Topographic diffusion and the rate of erosion on the Moon. *Journal of Geophysical Research: Planets* 119, 2255–2271 (2014).

Neumann, W., Jaumann, R., Castillo-Rogez, J., Raymond, C. A. & Russell, C. T. Ceres' partial differentiation: undifferentiated crust mixing with a water-rich mantle. *A&A* 633, A117 (2020).

Prettyman, T. H. et al. Extensive water ice within Ceres' aqueously altered regolith: Evidence from nuclear spectroscopy. *Science* 355, 55–59 (2017).

Ribeiro de Sousa, R. et al. Dynamical origin of the Dwarf Planet Ceres. *Icarus* 379, 114933 (2022).

Ross, H. P. A simplified mathematical model for lunar crater erosion. *Journal of Geophysical Research (1896-1977)* 73, 1343–1354 (1968).

Scully, J. E. C. et al. The varied sources of faculae-forming brines in Ceres' Occator crater emplaced via hydrothermal brine effusion. *Nat Commun* 11, 3680 (2020).

Sizemore, H. G. et al. A Global Inventory of Ice-Related Morphological Features on Dwarf

Planet Ceres: Implications for the Evolution and Current State of the Cryosphere. *Journal of Geophysical Research: Planets* 124, 1650–1689 (2019).

Soderblom, L. A., Kreidler, T. J. & Masursky, H. Latitudinal distribution of a debris mantle on the Martian surface. *Journal of Geophysical Research (1896-1977)* 78, 4117–4122 (1973).

Stein, N. T. et al. The formation and evolution of bright spots on Ceres. *Icarus* 320, 188–201 (2019).

Zambon, F. et al. Spectral analysis of Ahuna Mons from Dawn mission's visible-infrared spectrometer. *Geophysical Research Letters* 44, 97–104 (2017).

Altération d'organiques primordiaux : implications pour les satellites de glace et planètes naines

Pauline Lévêque * ¹, Olivier Bollengier ², Erwan Le Menn ², Clémence
Queffélec ³, Yves Marrocchi ⁴, Carlos Afonso ⁵, Isabelle Schmitz ⁶, Aneta
Slodczyk ^{7,8}, Rémi Champallier ^{9,10,11}, Christophe Sotin * [†] ¹², Bruno
Bujoli [‡] ^{3,13}

¹ Laboratoire de Planétologie et Géosciences [UMR_C6112] –
–*Université d'Angers, Institut National des Sciences de l'Univers, Centre National de la Recherche Scientifique, Nantes*
UMR des Sciences et des Techniques, Université d'Angers :
UMR6112, Institut National des Sciences de l'Univers :
UMR6112, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR6112 – France

² Laboratoire de Planétologie et Géosciences [UMR_C6112] –
–*Le Mans Université, Université d'Angers, Institut National des Sciences de l'Univers, Centre National de la Recherche Scientifique*
UMR des Sciences et des Techniques – 2 Rue de la Houssinière –
BP9220844322 NANTES CEDEX 3, France

³ CEISAM – Université de Nantes – France

⁴ Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques – Institut National des Sciences de l'Univers,
Université de Lorraine, Centre National de la Recherche Scientifique – CNRS / Université de Lorraine,
15 rue Notre-Dame des Pauvres, 54500 Vandœuvre-les-Nancy, France

⁵ Chimie Organique et Bioorganique : Réactivité et Analyse, UNIROUEN, INSA Rouen, CNRS,
(COBRA (UMR 6014°) – Université de Rouen Normandie – Rouen 76000, France

⁶ Laboratoire COBRA, UMR 6014 CNRS – Université de Rouen Normandie, Institut national des
sciences appliquées Rouen Normandie, Centre National de la Recherche Scientifique – France

⁷ ISTO – UMR 7327, Univ. Orléans, CNRS, BRGM, F-45071, Orléans, France – France

⁸ CEMHTI – CNRS UPR 3079, Université d'Orléans, Orléans Cedex 2, France – France

⁹ Univ d'Orléans – Université d'Orléans – Institut des Sciences de la Terre d'Orléans, UMR7327, 45071,
Orléans, France

¹⁰ CNRS/INSU – CNRS : UMR7327, INSU – Institut des Sciences de la Terre d'Orléans, UMR 7327,
45071, Orléans, France

¹¹ BRGM – BRGM – Institut des Sciences de la Terre d'Orléans, UMR 7327, BP 36009, 45060, Orléans,
France

¹² LPG Nantes – UMR6112 – France

¹³ IFSTTAR (IFSTTAR - Nantes) – MAST – France

Au cours des premiers stades du système solaire, des matières organiques primordiales ont pu se former à la suite de différents processus ; l'un d'entre eux par l'irradiation de la limite supérieure des disques protoplanétaires. Les corps primitifs du système solaire, tels que les comètes et les astéroïdes, ont accreté ces organiques lors de leur formation et contiennent aujourd'hui leurs résidus. Ces petits corps sont considérés comme les éléments constitutifs des planétésimaux qui

*Intervenant

[†]Auteur correspondant: Christophe.Sotin@univ-nantes.fr

[‡]Auteur correspondant: Bruno.Bujoli@univ-nantes.fr

s'accumuleront dans des corps plus grands tels que les satellites et les planètes. Au cours de cette étape spécifique, les matières organiques ont pu être confrontées à la température, à la pression et à la fonte de la glace qui ont pu les altérer et les transformer. L'objectif de cette étude est de comprendre comment les matières organiques primordiales complexes ont évolué au cours de la formation des corps glacés, sous l'effet de la température, la pression et l'eau liquide.

Tout d'abord, nous avons utilisé des analogues des composés organiques produits dans la couche supérieure des disques protoplanétaires (instrument Nebulotron, CRPG, Nancy) avec sept teneurs en azote différentes variant de $N/C=0$ à 0,63. Il a été montré précédemment que ces matières organiques peuvent être considérées comme de bons analogues de la matière organique insoluble des chondrites carbonées.

Ensuite, pour modéliser les conditions d'accrétion des planètes naines et des lunes glacées, nous avons utilisé des autoclaves à chauffage interne (IHPV) pour faire réagir des capsules scellées contenant de l'eau et de la MO du Nebulotron (50/50 en masse pour R1 et R2 et 90/10 pour R3).

Pour étudier la contribution de la température et de la pression à la transformation de la MO, nous avons effectué différents essais en autoclave : R1 a été réalisé à 4kbar - 200°C, R2 à 4kbar - 400°C et R3 à 1,35 kbar - 400°C.

À l'issue de ces expériences en autoclave, nous avons analysé les composés organiques résiduels en FT-ICR MS pour caractériser la transformation de la MO au niveau moléculaire. Il en ressort deux observations principales. À l'échelle de la classe chimique, la proportion de produits chimiques est très similaire pour les MO dont le rapport N/C est inférieur ou égal à 0,10. Cependant, à une échelle de classe chimique plus fine - déterminée par le nombre d'hétéroatomes - les molécules perdent des hétéroatomes (N et O seulement ici) avec l'augmentation de la température. Cette observation est faite après la comparaison de R1 et R2, entre 200°C et 400°C respectivement. Il est important d'ajouter que la pression ne semble pas avoir d'effet particulier sur la libération des hétéroatomes mais le ratio $H_2O:MO$ est prédominant (comparaison de R2 et R3, tous deux à 400°C mais à 4kabr et 1,35kbar respectivement).

Parallèlement à cette observation sur les résidus de MO, nous avons analysé la fraction volatile (gaz et liquide) des capsules scellées et observé une production de N_2 et CO_2 dès 200°C et de CH_4 pour les expériences à 400°C. De plus, les observations DRX nous ont confirmé la présence systématique de carbonate et la présence spécifique de carbonate d'ammonium dans la fraction liquide après la réaction de la MO avec le N/C le plus élevé. Ces données de chromatographie gazeuse sont complémentaires et concordantes avec les observations faites par FT-ICR, expliquant la perte d'oxygène et d'azote au niveau moléculaire.

Toutes ces observations mettent en évidence la potentielle source de volatils tels que le CO_2 , N_2 et CH_4 liée à la dégradation de la matière organique primitive lors de la formation des corps glacés. Ces produits de dégradation peuvent conduire à la formation de sels ou gaz dissout ou clathrates dans l'hydrosphère des satellites de glace planètes naines.

Formation of chemically stratified layer in Ganymede's ocean: implications for upcoming JUICE mission

Mathis Pinceloup * ¹, Mathieu Bouffard ², Steven Vance ³, Mohit Melwani ³, Marshall Styczinski ³

¹ Laboratoire de Planétologie et Géosciences [UMR_C6112] – *NantesUniversit* – *France*

² Laboratoire de Planétologie et Géosciences [UMR_C6112] – *NantesUniversit* – *France*

³ Jet Propulsion Laboratory – États-Unis

Chemically stratified layers in the deep oceans of icy moons may strongly influence the oceans' dynamics, thermal and chemical evolution, and therefore their habitability. Such layers can form during the differentiation of the refractory cores as they heat up due to the decay of long-lived radioactive elements. In the case of Ganymede, salts could be transported through the ice layer at high pressure or added to the ocean base by fractional crystallisation of the latter to form a denser bottom layer of salt water. Such a layer would inhibit ocean convection, limiting chemical and thermal transport. It is therefore crucial to understand how these layers form and what specific signatures they may leave in geophysical observations of future space missions. The present work describes numerical simulations of the formation of stratified layers and the predicted observables that could be detected by instruments on the JUICE spacecraft.

3-D numerical simulations of Ganymede's rotating ocean are performed with the PARODY code. Rayleigh-Bénard convection is imposed. We investigate the effect of either a constant flux of heavy salts or a fixed composition at the base of the ocean. Two regimes are identified by varying the dimensionless chemical Rayleigh (buoyancy over viscosity) and Schmidt numbers (viscosity over diffusivity). In the first regime, heavy salts are entrained and mixed in the convective region. In the second regime, the entrainment is too weak and a chemically stratified layer develops, eventually filling the entire ocean.

Extrapolation to Ganymede suggests the current existence of a chemically stratified layer at the base of the ocean. By considering different stratifications in Ganymede's ocean in the Planet-Profile and ForcedTides codes, we show that signatures of stratified layers might be detected in the gravity field, induced magnetic field, and tidal deformation responses. The problem of non-uniqueness in the individual observations points to the need to jointly invert these datasets from the JUICE mission to constrain the existence and properties of stratified oceanic layers.

*Intervenant

Microtexture de surface des satellites de glace

Frederic Schmidt ^{*} ^{1,2}, Cyril Mergny ³, François Andrieu ⁴, Barron Jean ⁵,
Hélène Massol ³, Guillaume Cruz Mermy ⁶, Inès Belgacem ^{7,8}

¹ Université Paris-Saclay – GEOPS UMR8148 – France

² Institut Universitaire de France – (IUF) – France

³ Géosciences Paris Saclay – Institut National des Sciences de l’Univers, Université Paris-Saclay, Centre National de la Recherche Scientifique, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR8148, Université Paris-Saclay : UMR8148, Institut National des Sciences de l’Univers : UMR8148 – France

⁴ Géosciences Paris Saclay – Institut National des Sciences de l’Univers, Université Paris-Saclay, Centre National de la Recherche Scientifique, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR8148, Université Paris-Saclay : UMR8148, Institut National des Sciences de l’Univers : UMR8148 – France

⁵ Géosciences Paris Saclay – CNRS, Université Paris-Sud - Université Paris-Saclay – France

⁶ European Space Astronomy Centre – Espagne

⁷ European Space Agency – ESA – France

⁸ Jet Propulsion Laboratory – États-Unis

Les surfaces des satellites de glace présentent certaines figures morphologiques dont la formation peut être expliquée en invoquant la présence de réservoirs d’eau liquide/saumure au sein de la lithosphère. Notamment la jeune et active surface du satellite jovien Europe présente des morphologies de doubles rides, plaines lisses, zone en ouverture... Identifier ces structures géologiques pourrait permettre la localisation des terrains les plus susceptibles de présenter des biosignatures et être utile dans le contexte des deux prochaines missions JUICE (ESA) et Europa Clipper (NASA). Dans ce cadre, notre équipe a étudié la surface des satellites de glace ainsi que les interactions surface - subsurface en se focalisant sur la microtexture, c’est-à-dire la texture à l’échelle des grains (composition, porosité, taille et forme des grains...). Nous utilisons deux approches complémentaires : l’analyse des données spectro-photométriques et la simulation numérique des propriétés microphysiques de la glace.

Le premier volet porte sur l’analyse des données des missions spatiales multi-angulaires (Belgacem et al., 2020a, 2022b, 2021) afin de déterminer la photométrie et les paramètres microphysiques y afférent. Ces résultats pointent certaines zones sur Europe diffusantes vers l’avant avec des grains plus sphériques et plus homogènes, vraisemblablement géologiquement récente. D’autre part, nous avons réalisé une étude spectroscopique pour déterminer la composition de la surface (Cruz Mermy et al., 2022) considérant les incertitudes et un large éventail de combinaisons possibles de composées. Une étude plus récente s’est focalisée sur la combinaison spectro-photométrique (Belgacem et al., 2024) afin de déterminer la dépendance en longueur d’onde des propriétés photométriques.

En support à l’interprétation de ces résultats, nous avons développé des outils de simulation numérique de microtexture avec des estimations de la porosité dans la proche surface (Mergny et al., 2023) ainsi que la structure thermique couplée aux mécanismes de métamorphisme (Mergny et al., 2024a, 2024b). Grâce à des algorithmes rapides, l’ensemble de ces simulations a pu atteindre pour la première fois le million d’année. Les résultats pointent vers une évolution différenciée

*Intervenant

d'Europe en fonction de la latitude, longitude et de l'albédo qui seront mis en regard avec les résultats des analyses de données précédentes.

Investigating the interior of Ganymede, Callisto and Europa with JUICE

Gabriel Tobie * ¹, Tim Van Hooslt ²

¹ Laboratoire de Planétologie et Géosciences – CNRS, Nantes Université – France

² Royal Observatory of Belgium = Observatoire Royal de Belgique – Belgique

On 14 April 2023, the JUpiter ICy moons Explorer (JUICE) of ESA was launched from Europe’s Spaceport in French Guiana. It will arrive at Jupiter and its moons in July 2031. Here we describe how JUICE will investigate the interior of the three icy Galilean moons, Ganymede, Callisto and Europa. Best insights into their interior, such as from an induced magnetic field, tides, rotation variations, and radar reflections, will be obtained during close flybys of the moons with altitudes of about 1000 km or less and during the Ganymede orbital phase at an average altitude of about 500 km and less. The 9-month long orbital phase around Ganymede, the first of its kind around another moon than our moon, will allow an unprecedented and detailed insight into the moon’s interior, from the central regions where a magnetic field is generated to the internal ocean and outer ice shell. Multiple flybys of Callisto will constrain the density structure, clarify the differences in evolution compared to Ganymede and will provide key constraints on the origin and early evolution of the Jupiter system. JUICE will visit Europa only during two close flybys and will perform geophysical investigations on selected areas, complementary to those performed by Europa Clipper.

We emphasize the synergistic aspects of the different geophysical investigations, showing how different instruments will work together to probe the hydrosphere, internal differentiation, dynamics, and evolution of these icy moons. In situ measurements and remote sensing observations will support the geophysical instruments to achieve these goals by providing complementary information about tectonics, potential plumes, surface composition, and exchange processes between ocean, ice and surface. Additional insight into the dissipative processes in the Jupiter system will be provided by accurate tracking of the JUICE spacecraft.

*Intervenant

Enceladus as a Potential Niche for Methanogens and Estimation of Its Biomass

Laura Tenelanda * ¹

¹ Universidad de Antioquia – Colombia

Enceladus is a potential target for future astrobiological missions. NASA's Cassini spacecraft demonstrated that the Saturnian moon harbors a salty ocean beneath its icy crust and the existence and analysis of the plume suggest water-rock reactions, consistent with the possible presence of hydrothermal vents. Particularly, the plume analysis revealed the presence of molecular hydrogen, which may be used as an energy source by microorganisms (e.g., methanogens). This could support the possibility that populations of methanogens could establish in such environments if they exist on Enceladus. We took a macroscale approximation using ecological niche modeling to evaluate whether conditions suitable for methanogenic archaea on Earth are expected in Enceladus. In addition, we employed a new approach for computing the biomass using the Monod growth model. The response curves for the environmental variables performed well statistically, indicating that simple correlative models may be used to approximate large-scale distributions of these genera on Earth. We found that the potential hydrothermal conditions on Enceladus fit within the macroscale conditions identified as suitable for methanogens on Earth, and estimated a concentration of 10^{10} – 10^{11} cells/cm³.

*Intervenant

Processus de formation et durée d'activité d'un ancien réseau fluvial sur Mars

Victor Belissa * ¹, Nicolas Mangold ¹, Anna Grau Galofre ¹

¹ Laboratoire de Planétologie et Géosciences UMR 6112, Nantes – Nantes Université, Univ Angers, Le Mans Université, CNRS, CNRS : UMR6112 – France

L'existence de vallées à la surface de Mars est une preuve que l'eau liquide était présente de manière stable et pérenne dans le temps. Cette présence signifie que, par le passé, la planète rouge devait disposer d'un climat bien plus humide et chaud qu'aujourd'hui, un climat peut être propice à l'apparition de la vie. L'étude des processus qui ont conduit à la création de ses vallées ainsi qu'à leur évolution constitue donc un enjeu de taille pour comprendre l'histoire passée de Mars et de déterminer si la vie a pu s'y développer. Le stage de Master 2, que je réalise actuellement sous la tutelle de Nicolas Mangold et Anna Grau-Galofre, s'intéresse à l'une de ces vallées qui n'a encore jamais été étudiée dans le détail ; la vallée de Baskhaus (située entre 24°S et 28°S et 1°O et 4°O). Une analyse des différentes données martiennes (CaSSIS, CTX, MOLA, SHARAD, HRSC...) via SIG a été conduite pour contraindre une durée d'activité ainsi que les processus de formation de cette vallée. J'ai pu réaliser une datation par comptage de cratères à travers les images CTX en faisant le distinguo entre cratères pré-activité (qu'on appelle Ghost Crater) du réseau et cratères post-activité du réseau. Ainsi, l'âge d'activité du réseau a été estimé entre 3.81Ga et 3.65Ga. Cette période d'activité est en accord avec la plupart des autres vallées situées dans les highlands martiens (Parana ou Loire valleys pour citer des réseaux proches de celui étudié), vallées qui auraient été actives à partir du milieu jusqu'à la fin du Noachien (Fassett et Head, 2008). Pour reconstruire une histoire évolutive du réseau, des profils longitudinaux le long des tributaires principaux ont été tirés, en utilisant les points PEDR de MOLA, et analysés sur ArcMap. Ceux-ci ont montré que ce réseau a évolué en plusieurs étapes (visibles notamment à travers la présence de plusieurs knickpoints). À ce stade, deux hypothèses existent pour expliquer les profils observés ; la première serait celle d'un ancien lac ayant subi au moins deux épisodes d'assèchement

*Intervenant

marqués par la présence de knickpoints sur certains des profils. La deuxième serait celle d'une différence de résistance de la roche mère entraînant une érosion différentielle pouvant expliquer les ruptures de pentes visibles. Enfin, des mesures hydrogéologiques du débit maximal ont pu être conduites sur certaines parties du réseau en utilisant des lois de puissances déduites dans le papier de Konsoer et al., 2017. Le débit calculé s'élève à environ 13 000 mètres cube par seconde dans l'un des tributaires principal de Baskhaus. Les calculs de l'exposant de Hack et d'angles de bifurcation au sein du réseau ont, de leur côté, permis de contraindre légèrement les conditions climatiques contemporaines à l'existence de cette vallée. En effet, ces deux mesures tendent à montrer (après comparaison avec des régions terrestres analogues comme la rivière Columbia aux États-Unis et mise en perspective avec le papier de Seybold et al., 2018 et celui de Rigon et al., 1996 notamment) que le climat était relativement sec et que l'eau de cette vallée provenait principalement de précipitation.

Références

- Fassett, C. I., & Head, J. W. (2008). The timing of martian valley network activity : Constraints from buffered crater counting. *Icarus*, 195 (1), 61-89. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2007.12.009>
- Konsoer, K., LeRoy, J., Burr, D., Parker, G., Jacobsen, R., & Turmel, D. (2017). Channel slope adjustment in reduced gravity environments and implications for Martian channels. *Geology*, 46. <https://doi.org/10.1130/G39666.1>
- Rigon, R., Rodriguez-Iturbe, I., Maritan, A., Giacometti, A., Tarboton, D. G., & Rinaldo, A. (1996). On Hack's Law. *Water Resources Research*, 32 (11), 3367-3374. <https://doi.org/10.1029/96WR02397>
- Seybold, H. J., Kite, E., & Kirchner, J. W. (2018). Branching geometry of valley networks on Mars and Earth and its implications for early Martian climate. *Science Advances*, 4 (6), eaar6692. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aar6692>

Dipping Layers on Mars give insights into the planet's glacial history

Evan Blanc ^{*† 1}, Susan Conway ¹, Frances Butcher ², Axel Noblet ³, Anna Grau Galofre ¹

¹ Laboratoire de Planétologie et Géosciences
[UMR_C6112] – *NantesUniversit, UnivAngers, LeMansUniversit, CNRS, CNRS :*
UMR6112 – France

² Department of Geography, Sheffield University – Royaume-Uni

³ Western University – Canada

We report the widespread occurrence of layered outcrops intimately associated with ice deposits in the mid-latitudes. For the first time we map the global extent of these deposits previously only reported in patches. We explore the relationship between these layered outcrops, debris covered glaciers and more recent ice deposits by exploiting images and elevation data from the HiRISE at 25 cm/pixel, Context camera at 6 m/pixel. We use topographic data from HiRISE stereo-images to study their detailed geometry. We find that these layered outcrops are extremely widespread in the martian mid-latitudes and have similar morphology in both the northern and the southern hemisphere pointing to a globally relevant process. We find these layered outcrops are conformal to topography and on low slopes. We hypothesise that they are patchy remnants of the basal layers of past ice (or ice rich) deposits. In Hellas Basin the layered outcrops are continuous with layers expressed in the hosting icy units, whereas elsewhere on Mars they are surrounded by younger icy deposits. We infer that in Hellas Basin we are seeing a snapshot of how these outcrops were formed elsewhere on Mars, but due to Hellas' unusual setting/climate, it is only here that the outcrops are preserved within their host ice. We hypothesise that these layered deposits inform us about the former extent of mid-latitude ice caps or ice sheets on Mars. Therefore, these Dipping Layers could give information of Mars climate beyond that obtainable by studying the polar caps and other well-studied mid-latitude ice deposits.

*Intervenant

†Auteur correspondant: evanblanc87@gmail.com

Des nouvelles de Perseverance et du programme de retour d'échantillons martiens (MSR)

Agnès Cousin * ¹

¹ Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie (IRAP) – Centre national d'études spatiales - CNES (FRANCE), Université Paul Sabatier-Toulouse III - UPS, CNRS : UMR5277, Observatoire Midi-Pyrénées - OMP (FRANCE) – France

La mission Mars2020 avec le rover Perseverance est la première étape d'un effort international pour un retour d'échantillons martiens sur Terre, via la mission Mars Sample Return (MSR) dans les années à venir. L'un des principaux objectifs de Perseverance est de collecter des échantillons pour chercher de potentielles traces de vie passées, tout en apportant une caractérisation géochimique et minéralogique de ceux-ci, in situ. Pour ceci, Perseverance a atterri en février 2021 dans le cratère de Jezero qui abrite un delta formé dans un ancien lac. Perseverance a depuis caractérisé l'environnement géologique passé de ce site tout en collectant 23 carottes (21 roches et 2 régolithes) ainsi qu'un échantillon atmosphérique et deux tubes témoins. Parmi ces tubes, dix provenant du fond du cratère ont été déposés au sol à Three Forks, avant d'entamer l'exploration du delta, afin de constituer le premier dépôt, considéré comme un plan de secours pour MSR.

A bord de Persévérance, l'instrument franco-américain SuperCam permet d'acquérir de nombreuses données sur les roches, les sols, ainsi que l'atmosphère environnant le rover. Il combine cinq techniques différentes afin de caractériser la chimie des roches (via la technique du LIBS), leur structure et leur minéralogie (via la spectroscopie Raman et Infra-Rouge, pour la première fois in situ), leur texture via le micro-imageur (RMI), et même certaines de leurs propriétés physiques grâce au microphone (en plus d'explorer l'atmosphère martienne). SuperCam analyse les cibles à distance ce qui permet des acquisitions en continu tout au long de la traverse pour mieux contextualiser les échantillons et les données locales obtenues par des instruments Raman et de fluorescence X à plus haute résolution (Sherloc et PIXL).

La première surprise a été d'échantillonner des roches ignées au fond du cratère avec la formation de Séitah consistant en un cumulat d'olivine et celle de Maàz formée par des laves de composition basaltique. Ces roches sont globalement peu altérées même si certains minéraux secondaires ont été localement détectés (carbonates, sulfates, phyllosilicates).

Les échantillons acquis dans le delta sont d'origine sédimentaire globalement détritique avec des grès à taille de grains variable. Au front du delta, la composition des roches est dominée par des phyllosilicates et des sulfates alors que les roches du sommet du delta montrent la présence de minéraux primaires (olivine, pyroxène) et de phases d'altération (carbonates, phyllosilicates). Perseverance explore actuellement les marges du cratère d'origine encore inconnue mais à la composition remarquable dominée par les carbonates et une phase de silice amorphe et des reliques

*Intervenant

de minéraux primaires.

L'ensemble de ces données et des échantillons seront présentés ainsi que les grandes lignes du programme MSR.

Modélisation de l'environnement et de l'habitabilité de Mars à travers le temps : le projet " Mars Through Time "

François Forget ^{*† 1}, Jean-Baptiste Clement ¹, Alexandre Gauvain ¹, Yangcheng Luo ¹, Maxime Maurice ¹, Joseph Naar ^{1,2}, Thomas Pierron ¹, Eran Vos ¹, Franck Lefèvre ², Martin Turbet ¹, Aymeric Spiga ¹, Ehouarn Millour ¹

¹ LMD, Laboratoire de Meteorologie Dynamique (UMR 8539) – Sorbonne Université, École Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris, ENS, PSL Research University, CNRS – France

² LATMOS – CNRS – France

Au cours des dernières décennies, l'exploration robotique de la planète Mars a produit une multitude d'observations géologiques. Ils montrent que Mars n'a pas toujours été la planète désertique que nous explorons aujourd'hui. Elle a connu des époques propices aux rivières et aux lacs, des périodes glaciaires pendant lesquelles Mars était couverte de glaciers et d'épais nuages, et même des périodes presque sans atmosphère car elle était gelée sous forme de glaciers de CO₂. Ces différentes époques sont la raison pour laquelle Mars reste l'objectif de nombreuses agences spatiales. Elles évoquent la possibilité d'une habitabilité passée et de changements climatiques spectaculaires. Pourtant, malgré toutes les données disponibles, les processus climatiques qui ont façonné la surface de Mars au fil du temps restent largement inconnus. Que s'est-il passé sur Mars ? La planète rouge était-elle propice à la vie ? Comment expliquer son évolution ?

L'objectif du projet Mars Through Time, soutenu par le European Research Council (ERC), est de développer des modèles numériques pour simuler les environnements passés de Mars.

Un " **Planetary Evolution Model** " (PEM) sans précédent été créé pour simuler l'hydrologie (modélisation des lacs et des rivières à partir de l'estimation des précipitations et de l'évaporation) la formation de glaciers et leurs écoulements (pour la glace H₂O et CO₂), et la glace du sous-sol. En pratique ce modèle PEM utilise en " sous-programme " et de manière asynchrone le modèle de climat global 3D du LMD (à présent nommé le Mars Planetary Climate Model, ou PCM) pour calculer le climat en fonction des conditions de surface, de l'atmosphère et de l'orbite, et ainsi estimer régulièrement les précipitations, l'évaporation et la diffusion dans le sous-sol. Le PEM permet de simuler l'évolution de la surface martienne, la formation de toutes sortes de dépôts sédimentaires, et de caractériser l'érosion lors de simulation de plusieurs milliers, voire millions d'années.

Le **Planetary Climate Model** (PCM) est amélioré pour représenter tous les processus météorologiques qui se sont déroulés sur Mars lorsque son environnement a évolué en raison des oscillations de

*Intervenant

†Auteur correspondant: forget@lmd.jussieu.fr

son orbite et de son obliquité, où lorsque son atmosphère était plus épaisse. Le modèle martien actuel comprend désormais une représentation des microclimats qui peuvent se produire sur les pentes locales et de leur effet sur la thermodynamique des glaces en surface et sous la surface. Nous construisons également un nouveau modèle du cycle de poussière avec pour objectifs de simuler indépendamment et de manière réaliste le soulèvement, le transport et la sédimentation de la poussière. Un tel modèle permettra d'explorer la nature des cycles de poussières dans le passé.

Ces nouveaux outils permettent de s'attaquer à de nombreuses énigmes rencontrées dans les sciences de Mars et sa géologie. Nous découvrons que Mars autrefois a pu être encore plus différente d'aujourd'hui que nous ne le pensions, que les archives géologiques se forment lorsque l'environnement sur Mars évolue au grés des variations orbitales et de rotations, ou à la suite d'impact ou d'éruptions volcaniques. Ils offrent également une nouvelle plateforme pour étudier des processus spécifiques tels l'échappement atmosphérique, l'aéronomie au fil du temps, et l'altération chimique du sol.

Analyse par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse de matière organique en présence de sulfates : enseignements pour l'instrument SAM de la mission Mars Science Laboratory

Théo Govekar ^{*† 1}, Cyril Szopa ¹, Maëva Millan ¹, Caroline Freissinet ¹,
Arnaud Buch ², David Boulesteix ²

¹ Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales – Laboratoire Atmosphères, Observations Spatiales (LATMOS), Université Versailles St-Quentin, UPMC Université Paris 06, CNRS, LATMOS, 11 Boulevard d'Alembert, 78280 Guyancourt, France – France

² Laboratoire de Génie des Procédés et Matériaux – Laboratoire de Génie des Procédés et Matériaux (LGPM), CentraleSupélec, Gif-sur-Yvette, France – France

La surface de Mars est toujours à l'heure actuelle l'un des environnements du système solaire où sont recherchés des indices de chimie prébiotique passée, et potentiellement d'activité biologique. Pour cette raison, l'instrument Sample Analysis at Mars (SAM), embarqué à bord du rover Curiosity de la mission Mars Science Laboratory (MSL), a pour objectif la détection de composés organiques et inorganiques dans le cratère Gale. Au cours des dernières années, lors de son ascension du Mont Sharp, le rover Curiosity a exploré une région dont les sols sont riches en sulfates, tels des sulfates de magnésium. A l'instar d'autres phases minérales et inorganiques, les sulfates peuvent contenir de la matière organique et la maintenir à l'abri des conditions environnementales de surface défavorables à leur conservation. De même, ils peuvent intervenir chimiquement dans l'extraction de la matière organique par les techniques de préparation d'échantillons utilisées par SAM, c'est-à-dire la pyrolyse, la dérivatisation chimique et la thermochemolyse. Pour ces raisons, nous nous sommes intéressés aux interactions possibles entre le sulfate de magnésium et quatre molécules organiques d'intérêt vis-à-vis de la surface de Mars et de l'exobiologie, pour estimer la capacité de SAM à les détecter. Nous avons également travaillé à l'analyse d'échantillons naturels contenant des sulfates afin d'extrapoler nos résultats à des échantillons plus complexes que des échantillons de synthèse. Ces résultats sont utilisés pour interpréter les analyses de l'instrument SAM, mais pourront servir également à l'instrument MOMA (Mars Organic Molecules Analyzer) de la mission Exomars rover si des sulfates sont présents dans le sol d'Oxia Planum.

*Intervenant

†Auteur correspondant: theo.govekar@gmail.com

The triggering factors and mobility of Martian Landslides

Emma Genin ^{*† 1}, Susan Conway ¹, Nicolas Mangold ²

¹ Laboratoire de Planétologie et Géosciences
[UMR_C6112] – –*NantesUniversit, UnivAngers, LeMansUniversit, CNRS, CNRS* :
UMR6112 – –France

² Laboratoire de Planétologie et Géosciences
[UMR_C6112] – –*NantesUniversit, UnivAngers, LeMansUniversit, CNRS, CNRS* :
UMR6112 – –France

Landslides are a common phenomenon on Mars and the emblematic large long run-out landslides have been highly studied (Lucas et al., 2014; Lucchitta, 1978; Magnarini et al., 2021; McEwen, 1989; Quantin et al., 2004). Few studies have focused on understanding smaller (< 5 km) landslides (Guimpier et al., 2021; Pajola et al., 2022) despite their much wider distribution (Crosta et al., 2018). The mobility of landslides gives important information on the types of material mobilised and whether water/ice was involved. However, there are many methods to measure mobility (Li et al., 2020; Mitchell et al., 2020; Wallace and Santi, 2021). In this study, we use high resolution topographic data (1 m/pix) from HiRISE within a GIS to accurately determine the landslide volume and distribution of erosion and deposition (Guimpier et al., 2022). We use the volume and topographic data to calculate commonly used mobility indexes from the literature and compare to other terrestrial landslides. We use these analyses and all available imaging data to infer the possible preparatory and triggering factors of these small landslides on Mars.

References

Crosta, G.B., Frattini, P., Valbuzzi, E., De Blasio, F.V., 2018. Introducing a New Inventory of Large Martian Landslides. *Earth Space Sci.* 5, 89–119. <https://doi.org/10.1002/2017EA000324>

Guimpier, A., Conway, S.J., Mangeney, A., Lucas, A., Mangold, N., Peruzzetto, M., Pajola, M., Lucchetti, A., Munaretto, G., Sæmundsson, T., Johnsson, A., Le Deit, L., Grindrod, P., Davis, J., Thomas, N., Cremonese, G., 2021. Dynamics of recent landslides (

Guimpier, A., Conway, S.J., Pajola, M., Lucchetti, A., Simioni, E., Re, C., Noblet, A., Mangold, N., Thomas, N., Cremonese, G., 2022. Pre-landslide topographic reconstruction in Baetis Chaos, mars using a CaSSIS Digital Elevation Model. *Planet. Space Sci.* 218, 105505. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2020.105505>

Li, L., Lan, H., Strom, A., 2020. Automatic generation of landslide profile for complementing landslide inventory. *Geomat. Nat. Hazards Risk* 11, 1000–1030. <https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1766570>

Lucas, A., Mangeney, A., Ampuero, J.P., 2014. Frictional velocity-weakening in landslides on

*Intervenant

†Auteur correspondant: emma.genin@etu.univ-nantes.fr

Earth and on other planetary bodies. *Nat Commun* 5.

Lucchitta, B.K., 1978. A large landslide on Mars. *Geol. Soc. Am. Bull.* 89, 1601. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1978\)892.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1978)892.0.CO;2)

Magnarini, G., Mitchell, T.M., Grindrod, P.M., Schmitt, H.H., Petro, N.E., 2021. Scaling Relationship Between the Wavelength of Longitudinal Ridges and the Thickness of Long Runout Landslides on the Moon. *J. Geophys. Res. Planets* 126. <https://doi.org/10.1029/2021JE006922>

McEwen, A.S., 1989. Mobility of large rock avalanches: Evidence from Valles Marineris, Mars. *Geology* 17, 1111–1114. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1989\)0172.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1989)0172.3.CO;2)

Mitchell, A., McDougall, S., Nolde, N., Brideau, M.-A., Whittall, J., Aaron, J.B., 2020. Rock avalanche runout prediction using stochastic analysis of a regional dataset. *Landslides* 17, 777–792. <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01331-3>

Pajola, M., Mergili, M., Cambianica, P., Lucchetti, A., Brunetti, M.T., Guimpier, A., Mastrogiuseppe, M., Munaretto, G., Conway, S., Beccarelli, J., Cremonese, G., 2022. Modelling reconstruction and boulder size-frequency distribution of a young (

Quantin, C., Allemand, P., Delacourt, C., 2004. Morphology and geometry of Valles Marineris landslides. *Planet Mars Spons. Cent. Natl. Etudes Spatiales CNES Cent. Natl. Rech. Sci. CNRS Obs. Paris* 52, 1011–1022. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2004.07.016>

Wallace, C.S., Santi, P.M., 2021. Runout Number: A New Metric for Landslide Runout Characterization. *Environ. Eng. Geosci.* 27, 455–470. <https://doi.org/10.2113/EEG-D-20-00144>

Negligible flow and deformation in the North Polar Layered Deposits, Mars

Anna Grau Galofre * ¹

¹ Laboratoire de Planétologie et Géosciences – Nantes Université, Univ Angers, Le Mans Université, CNRS, CNRS : UMR6112 – France

The North Polar Layered Deposit (NPLD) is a large-scale glacial deposit located on Mars' north polar region. Radar observations unveiled an internal structure consisting of alternating ice and dust-rich layers, extending to a maximum depth of 3 km, each about 100 m thick. Numerous studies have investigated the NPLD glacial dynamics in an effort to understand mass fluxes through history and in response to climate changes, however, no study has taken the layered stratigraphy into account. Previous studies that predict ice flow velocities that could be observable at the scale of HiRISE (cm/yr) contrast with the lack of evidence found in image or radar data of visible NPLD reflector deformation.

Here we develop a stratified ice flow model that is suitable for RADAR and image observations of ice confined within layers. Under full Stokes flow and absence of basal or internal slip we use the Hele-Shaw approximation (layer thickness much smaller than NPLD half-length). We start by assuming confined flow within dust layers that do not break or deform in order to calculate the velocity profile. We then test the internal stability and cohesion of the dust layers using three models: dirty ice, frozen ground, and lithified material. Our findings show that layered ice dynamics are substantially different from bulk glacial dynamics, yielding ice velocities of 1cm/Myr. Under these conditions, dust layers consisting of frozen or lithified ground behave elastically. Our results explain the lack of visible ice flow and deformation within the NPLD both in ice marginal image data and radar observations. Our findings also require dust layers to have a certain internal cohesion, but do not distinguish between frozen ground and lithified material. Ice dynamics explored here have implications for layered ice deposits elsewhere on Mars.

*Intervenant

Glacial and subglacial sculpture of a suite of four craters NE of Hellas basin, Mars

Anna Grau Galofre * ¹, Alan Howard ²

¹ Laboratoire de Planétologie et Géosciences – Nantes Université, Univ Angers, Le Mans Université, CNRS, CNRS : UMR6112 – France

² Planetary Science Institute [Tucson] – États-Unis

The interiors and exteriors of the > 25 km diameter Batson, Nako, Salkhad, and Jori craters (and McCauley crater to a lesser degree) on the northeastern Hellas basin rim were extensively modified by glacio-fluvial and glacio-lacustrine activity during the Middle and Late Amazonian, from some time before 1.4 Ga to the present as revealed by CTX, HiRISE, and CaSSIS observations. This work presents extensive descriptions and discussions of individual candidate glacial and glaciofluvial landforms associated with cratered landscapes, as well as their spatial association. We also present absolute age dates and a relative sequence of events, followed by a possible environmental reconstruction, involving a regional ice cover, subglacial meltwater, and ice-covered lakes. On crater interiors, inferred glacial modification included dissection of interior rims, emplacement of depositional aprons with basinward scarps, remnant glaciers and associated fresh shallow valleys, supraglacial debris, and candidate moraines. On crater exterior rims and on the plateaus surrounding Batson crater we describe moderate incision and sedimentation, subglacial meltwater runoff through Navua A Valles, candidate eskers, valleys discordant with topography but concordant with inferred ice flow direction, hummocky material, among others. Wet-based glaciation and subglacial runoff may have been favored due to a locally enhanced geothermal heating or strain heating on steep crater slopes. This work presents detailed guidelines for the identification of glacial and subglacial runoff associated with the region of study, and beyond to other cratered regions on Mars.

*Intervenant

Distribution et caractéristiques morphologiques des escarpements glacés aux moyennes latitudes sur Mars.

Noé Le Becq * ¹, Susan Conway ¹, Anna Grau Galofre ¹, Nicolas Mangold ¹

¹ Laboratoire de Planétologie et Géosciences – Nantes Université, Univ Angers, Le Mans Université, CNRS, CNRS : UMR6112 – France

L'étude de la distribution et de l'accessibilité de la glace d'eau aux moyennes latitudes est un enjeu majeur pour l'exploration habitée de Mars dans les décennies à venir, puisque l'eau est une ressource indispensable au soutien des activités d'une base martienne. Par ailleurs, comprendre la répartition géographique et les propriétés physiques de la glace devrait permettre de fournir des informations sur son origine, et donc sur l'histoire climatique récente de la planète.

Sur Mars, les moyennes latitudes sont couvertes d'un dépôt lisse qui semble draper la topographie : le " latitude dependant mantle " (couramment abrégé LDM). Ce manteau, observé dans les deux hémisphères, est presque continu au-delà de 55° de latitude, et devient plus fin, dégradé et discontinu vers les plus faibles latitudes, disparaissant autour de 30°N/25°S (Mustard et al., 2001 ; Head et al., 2003). Le très faible taux de cratérisation indique l'origine récente du LDM, dont le dépôt aurait eu lieu il y a moins de 2 Ma (Kostama et al., 2006 ; Levy et al. 2009 ; Schon et al., 2009). Par ailleurs, de nombreuses observations géomorphologiques indiquent la richesse en glace d'eau du LDM (Milliken et al., 2003 ; Mellon et al., 2009), qui pourrait s'être formé par accumulation de dépôts atmosphériques mêlant neige et poussière durant des périodes de haute obliquité de la planète rouge (Forget et al., 2006 ; Madeleine et al., 2009 ; Naar et al., 2020).

Alors que la glace présente dans le LDM est habituellement couverte d'une couche de régolithe de plusieurs centimètres d'épaisseur, certaines structures érosives récentes l'exposent à l'air libre et permettent d'explorer la structure interne du manteau. Dundas et al. (2018, 2021) a ainsi révélé la présence d'escarpements glacés, principalement situés autour de la bordure sud du bassin d'Hellas pour l'hémisphère sud et dans Arcadia Planitia pour l'hémisphère nord. Placés à l'extrémité d'une dépression similaire aux morphologies de thermokarst observées ailleurs sur Mars (Costard et al., 1995 ; Séjourné et al., 2012), ces escarpements sont quasi rectilignes et font directement face aux pôles, avec une pente le plus souvent comprise entre 45 et 60°. Ils exposent un matériel stratifié de couleur bleutée sur les images HiRISE et CaSSIS, que les observations spectroscopiques de CRISM ont confirmé être de la glace d'eau massive dont la contamination lithique serait inférieure à 1 %. De récents modèles de sublimation des escarpements suggèrent que ces derniers se retirent activement à une vitesse de quelques mm par an, à mesure que la glace se sublime (Williams et al., 2022).

Dans ce contexte, nous proposons de compléter la cartographie des escarpements glacés sur l'entièreté de la surface de Mars à partir de la mosaïque d'images CTX et de continuer à explorer

*Intervenant

les caractéristiques physiques et morphologiques des escarpements ainsi que leurs variations spatiales en croisant les jeux de données disponibles (HiRISE, CaSSIS, THEMIS, modèles). Nous mesurons par exemple la longueur et l'orientation de chaque escarpement, la surface de la dépression associée, ainsi que la direction de retrait. Nous utilisons également des DTM produits avec images HiRISE afin de mesurer la pente des escarpements et le volume de la dépression. Aussi, en nous intéressant à la topographie environnante, nous montrons que la direction des pentes accueillant des escarpements semble suivre une tendance régionale qui pourrait être liée au sens du vent. Par ailleurs, nous notons que les escarpements de l'hémisphère sud se trouvent dans une zone où le LDM est particulièrement continu et où la topographie est plutôt importante. Nous planifions également de nous intéresser aux données d'inertie thermique ainsi qu'à l'étude des strates exposées sur certains escarpements.

Références :

Costard, F. M. & Kargel, J. S. Outwash Plains and Thermokarst on Mars. *Icarus* 114, 93–112 (1995).

Dundas, C. M. et al. Exposed subsurface ice sheets in the Martian mid-latitudes. *Science* 359, 199–201 (2018).

Dundas, C. M. et al. Widespread Exposures of Extensive Clean Shallow Ice in the Midlatitudes of Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets* 126, e2020JE006617 (2021).

Forget, F., Haberle, R. M., Montmessin, F., Levrard, B. & Head, J. W. Formation of Glaciers on Mars by Atmospheric Precipitation at High Obliquity. *Science* 311, 368–371 (2006).

Head, J. W., Mustard, J. F., Kreslavsky, M. A., Milliken, R. E. & Marchant, D. R. Recent ice ages on Mars. *Nature* 426, 797–802 (2003).

Kostama, V.-P., Kreslavsky, M. A. & Head, J. W. Recent high-latitude icy mantle in the northern plains of Mars: Characteristics and ages of emplacement. *Geophysical Research Letters* 33, (2006).

Levy, J., Head, J. & Marchant, D. Thermal contraction crack polygons on Mars: Classification, distribution, and climate implications from HiRISE observations. *Journal of Geophysical Research: Planets* 114, (2009).

Madeleine, J.-B. et al. Amazonian northern mid-latitude glaciation on Mars: A proposed climate scenario. *Icarus* 203, 390–405 (2009).

Mellon, M. T. et al. Ground ice at the Phoenix Landing Site: Stability state and origin. *Journal of Geophysical Research: Planets* 114, (2009).

Milliken, R. E., Mustard, J. F. & Goldsby, D. L. Viscous flow features on the surface of Mars: Observations from high-resolution Mars Orbiter Camera (MOC) images. *Journal of Geophysical Research: Planets* 108, (2003).

Mustard, J. F., Cooper, C. D. & Rifkin, M. K. Evidence for recent climate change on Mars from the identification of youthful near-surface ground ice. *Nature* 412, 411–414 (2001).

Naar, J. et al. Formation and Stability of Martian Mid-Latitude Water Ice Deposits at High Obliquity. <https://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC2020/EPSC2020-322.html> (2020)

Schon, S. C., Head, J. W. & Milliken, R. E. A recent ice age on Mars: Evidence for climate oscillations from regional layering in mid-latitude mantling deposits. *Geophysical Research Letters* 36, (2009).

Séjourné, A., Costard, F., Gargani, J., Soare, R. J. & Marmo, C. Evidence of an eolian ice-rich and stratified permafrost in Utopia Planitia, Mars. *Planetary and Space Science* 60, 248–254 (2012).

Williams, K. E., Dundas, C. M. & Kahre, M. A. The formation mechanisms for mid-latitude ice scarps on Mars. *Icarus* 386, 115174 (2022).

Unravelling the geological history of cratered worlds through machine learning techniques

Anthony Lagain ^{*† 1,2,3}, Konstantinos Servis ⁴, John Fairweather ³,
Gretchen Benedix ⁵

¹ Institut ORIGINES – Aix Marseille Univ – France

² Centre européen de recherche et d'enseignement de géosciences de l'environnement – Aix Marseille Université, CNRS : UMR7330, Institut national de la recherche agronomique (INRA), Institut de recherche pour le développement [IRD] – France

³ School of Earth and Planetary Science [Curtin university] – Australie

⁴ CSIRO Computational Informatics – Australie

⁵ Planetary Science Institute [Tucson] – États-Unis

Thanks to advances in machine learning, it is now possible to analyze high-resolution imagery dataset of planetary surfaces offered by space probes acquired over the last decades. During this presentation, I will introduce a machine learning algorithm capable of detecting millions of impact craters on Mars and the Moon. I will show how it can be used to visualize the cratering record of terrestrial bodies, infer their geological history, the properties of the surface as well as the evolution of impactor reservoirs through case studies. I will finally present the usefulness of such an algorithm for the analysis of future imagery datasets.

*Intervenant

†Auteur correspondant: lagain@cerege.fr

Ice on the surface and in the subsurface of Mars: Review and new ideas

Lucas Lange ^{*† 1}, Francois Forget ²

¹ Laboratoire de Météorologie Dynamique (UMR 8539) – Institut National des Sciences de l’Univers, Ecole Polytechnique, Ecole des Ponts ParisTech, Sorbonne Université, Centre National de la Recherche Scientifique, Département des Géosciences - ENS Paris, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR8539 – France

² Laboratoire de Météorologie Dynamique (UMR 8539) – CNRS, Sorbonne Universités, UPMC, CNRS, Ecole Polytechnique Université Paris Saclay, École normale supérieure [ENS] - Paris – France

Widespread exposures of water ice on the Martian surface and subsurface have been reported in the literature, holding the keys to understanding Mars’ past and present climates.

Although the Martian atmosphere is relatively dry today, significant quantities of water ice have been discovered in the Martian subsurface at high latitudes. Some of the key questions related to this discovery are: 1) When such massive ice deposits have formed? 2) How they have formed? 3) Are they stable today? Climate models suggest that this ice may have formed in the past, when the obliquity of the planet was greater, and Mars was mostly covered by a snow cover. As the obliquity decreased, the ice has been buried and protected from the sublimation by a lag deposit. It has been suggested that this ice might be in equilibrium with the atmosphere. However, the recent discovery, through impact craters, of massive ice buried in the shallow subsurface up to 35° latitude, where models do not predict stable subsurface ice, challenges this theory. During this conference, we will present possible scenarios for the formation of this buried ice, their link with past climates, and why it is still here today. We will also propose a comparative approach with permafrost studies carried out in the dry valleys of Antarctica.

Conversely, the quantities of water frost forming on the surface of Mars, outside the polar regions, are very small: from a few micrometers to mm thick. One major question is whether these ices can eventually form liquid water. This interest has been stimulated by observations of the famous “gullies” on crater slopes, whose similarities to terrestrial gullies suggest significant water flows on Mars in a recent past. However, we will show in this talk that models suggest 1) that it is virtually impossible to melt pure ice on the surface, due to the violent cooling induced by the rapid sublimation of ice; and 2) that liquid water is highly unstable due to the low Martian pressure. We will study the possibility of melting ice buried beneath the surface in the present or past climate.

*Intervenant

†Auteur correspondant: lucas.lange@lmd.ipsl.fr

CO₂ Ice Properties and Structure using CRISM Data: a Glimpse into the Formation Mechanism of Martian Gullies

Apolline Leclef ^{*† 1}, Mathieu Vincendon ¹, Cateline Lantz ¹, Susan Conway ²,
Marion Masse ², Kelly Pasquon ²

¹ Institut d'astrophysique spatiale – CNRS, Université Paris-Saclay, Sorbonne Universités – France

² Laboratoire de Planétologie et Géosciences

[UMR_C6112] – *Nantes Université, Univ Angers, Le Mans Université, CNRS, CNRS :*
UMR6112 – France

”Gullies” are slope flow structures identified on Mars mostly at mid to high latitudes. Gullies with present-day activity are found where seasonal surface ice is present (1). Three main ice-related formation mechanisms have been discussed so far: a) water ice transitioning to liquid and flowing down slopes (2); b) translucent layer of CO₂ ice forming CO₂ geysers under the sun’s heat (3); c) granular CO₂ ice triggering dry avalanches and/or fluidizing the regolith with the gas released (4). Recent studies suggest that CO₂ ice plays a dominant role in gully formation. This study aims to model CO₂ ice properties at Sisyphi Cavi, a site with active gullies, determining whether the CO₂ ice is translucent or granular using CRISM data from the Mars Reconnaissance Orbiter (NASA).

CO₂ ice spectra from CRISM are modeled assuming the ice is transparent. The inferred CO₂ ice thickness is then compared to climatological model predictions to evaluate this hypothesis (5). In more details, by analyzing various azimuthal orientations, the model accounts for slope-dependent ice thickness, thicker on pole-facing slopes and thinner on equator-facing slopes. A database of CO₂ ice spectra with varying optical paths is created using reference spectra (6) and compared to CRISM data. The optical path is converted to an ice thickness by considering an empirical geometrical factor, and this thickness is then compared to climatic model predictions (7, 8): if the modeled ice thickness aligns with climatological predictions, it suggests the ice is translucent, while misalignment indicates photons confined to the upper part of the ice layer, suggesting a granular state.

At Sisyphi Cavi, comparing CRISM-derived CO₂ ice thicknesses with climate model predictions shows good alignment in trends and absolute values, supporting the hypothesis of translucent ice at LS 227.02°. Non-icy material is estimated at 40-50%, likely due to surface regolith, atmospheric dust scattering photons, or contaminants within the ice. This study thus indicates that the ice observed at LS 227.02° in Sisyphi Cavi might be in a translucent state. Future research will expand this methodology to other solar longitudes within Sisyphi Cavi, starting with an observation at LS 183.25°. The goal is to assess whether ice transparency changes seasonally

*Intervenant

†Auteur correspondant: apolline.leclef@universite-paris-saclay.fr

and with slope orientation, and to explore correlations between ice state and gully activity. Additional sites with active gullies will also be examined.

References: (1) Dundas C. M. et al. (2022) *Icarus*, 386, 115133. (2) Costard F. et al. (1996) *Science*, 295, 110–113. (3) Pilorget C. and Forget F. (2015) *Nature Geoscience*, 9, 65–71. (4) Pasquon K. et al. (2019) *Icarus*, 329, 296–313 (5) Andrieu F. et al. (2018), *Icarus*, 315, 158-173. (6) Quirico E. and Schmitt B. (2004) SSHADE/GhoSST. (7) Forget F. et al. (1999) *J. Geophys. Res.*, 104, E10. (8) Vincendon M. et al. (2010) *J. Geophys. Res.*, 115, E10001.

Un nouveau regard sur le croûte primitive de Mars à partir de la minéralogie accessoire et de l'altération de la météorite Black Beauty

Virgile Malarewicz , Olivier Beyssac* ¹, Brigitte Zanda †‡ ², Hugues Leroux ³, Sylvain Bernard ⁴, Sylvain Bouley ⁵, Roger Hewins ⁴

¹ Institut de Minéralogie, de Physique des Matériaux et de Cosmochimie (IMPMC) – Sorbonne Université UPMC Paris VI, CNRS : UMR7590, Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN) – France

² Institut de Minéralogie, de Physique des Matériaux, et de Cosmo-chimie (IMPMC) – Sorbonne Universités, UPMC, CNRS, Museum National d'Histoire Naturelle - MNHN (FRANCE) – France

³ Unité Matériaux et Transformations – Université de Lille - Sciences et Technologies – France

⁴ Institut de Minéralogie, de Physique des Matériaux, et de Cosmo-chimie (IMPMC), Sorbonne Université, Muséum national d'Histoire naturelle, UPMC Université Paris 06, UMR CNRS 7590, IRD UMR 206, 75005 Paris. – Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie – France

⁵ CNRS, GEOPS UMR 8148, Orsay – Université de Paris-Sud Orsay – France

La météorite dite Black Beauty (NWA 7533, NWA 7034 et météorites appariées) constitue un échantillonnage unique de la surface de Mars. Il s'agit d'une brèche de régolithe constituée d'une matrice microcristalline contenant une extraordinaire diversité de clastes lithiques correspondant à différents stades de différenciation géochimique. Ces clastes ont des compositions basaltiques jusqu'à monzonitiques, en passant par des roches fondues (Hewins et al. 2017) et certains contiennent des zircons datés à 4.4 milliards d'années (Humayun et al., 2013), correspondant à l'âge du plus ancien des zircons terrestres connus. Black Beauty offre donc une vision unique sur les processus géologiques primitifs à la surface de Mars. Avec d'autres observations récentes, son étude contribue à renouveler complètement le consensus antérieur d'un monde basaltique monotone avec, par endroits, une altération locale principalement due à l'activité hydrothermale. En effet, grâce aux instruments embarqués, dont la ChemCam LIBS, Sautter et al. (2016) ont découvert des roches felsiques aux compositions minéralogiques et chimiques moyennes très différenciées, allant des basaltes alcalins aux trachytes. Par ailleurs, des reconstructions récentes de l'épaisseur passée de la croûte de Mars suggèrent l'existence d'un ancien bloc crustal comprenant des roches chimiquement différenciées dans la région de Terra Cimmeria/Sirenum dans l'hémisphère sud (Bouley et al. 2020). L'ensemble de ces nouvelles observations ont fait émerger un modèle chimique et lithologique plus complexe pour les vastes terrains les plus anciens de la période noachienne.

Nous avons montré (Lagain et al., 2022) que le cratère de la surface de Mars dont a été éjecté Black Beauty se trouve précisément en périphérie du bloc crustal de Terra Cimmeria/Sirenum, ce qui renforce notre intérêt pour les clastes chimiquement évolués de cette météorite. Nos observations (Malarewicz 2023) indiquent que les zircons contenus dans ces clastes et utilisés pour

*Auteur correspondant: olivier.beyssac@upmc.fr

†Intervenant

‡Auteur correspondant: brigitte.zanda@mnhn.fr

les dater ne sont pas des grains entiers mais seulement des fragments et qu'ils présentent des zonations complexes avec des degrés de cristallinité très différents. L'étude de ces grains au microscope électronique à transmission met en évidence que les différentes zones sont marquées par des porosités dont la taille est de l'ordre de la centaine de nanomètres, plus ou moins abondantes, de forme variable et localement remplies secondairement par des inclusions d'oxyde ou de sulfure de fer. De telles observations sont totalement nouvelles dans les zircons les plus anciens connus – ceux de la Terre y compris. Elles suggèrent une histoire complexe, combinant métamictisation et altération par des fluides de compositions variées, ayant creusé les cavités puis rempli secondairement certaines d'entre-elles. Enfin, nous avons découvert dans Black Beauty une zone fondue particulière dont les clastes ignés particulièrement évolués contenant des grains de quartz associés à des feldspaths (potassique et sodique) s'apparentent à des granites. Ces clastes sont la première mise en évidence de roches granitiques pré-noachiennes et les plus anciens échantillons de croûte continentale connus dans le Système solaire. Les textures observées dans les zircons et la présence de quartz dans certains clastes témoignent de la présence d'eau à la surface de Mars moins de 100 millions d'années après sa formation.

Bouley, S. et al. A thick crustal block revealed by reconstructions of early Mars highlands. *Nat. Geosci.* 13, 105–109 (2020).

Hewins, R. H. et al. Regolith breccia Northwest Africa 7533: Mineralogy and petrology with implications for early Mars. *Meteorit. Planet. Sci.* 52, 89–124 (2017).

Humayun, M. et al. Origin and age of the earliest Martian crust from meteorite NWA 7533. *Nature* 503, 513–516 (2013).

Lagain, A., Bouley, S., Zanda, B., Miljković, K., Rajšić, A., Baratoux, D., Payré, V., Doucet, L.S., Timms, N.E., Hewins, R., Benedix, G.K., Malarewic, V., Servis, K., Bland, P.A., 2022. Early crustal processes revealed by the ejection site of the oldest martian meteorite. *Nat. Commun.* 13, 3782. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31444-8>

Malarewicz, thèse soutenue à l'Université Paris-Saclay le 21 décembre 2023.

Sautter, V. et al. Magmatic complexity on early Mars as seen through a combination of orbital, in-situ and meteorite data. *Lithos* 254–255, 36–52 (2016).

Robust automatic crater detection on the full planet Mars using AI

Léo Martinez ^{*† 1}, Frederic Schmidt ^{2,3}, François Andrieu ², Mark Bentley ⁴, Hugues Talbot ^{5,6}

¹ Géosciences Paris Saclay (GEOPS) – GEOPS UMR8148 – Université Paris Saclay, bât. 504 510, 91405 ORSAY Cedex, France

² Géosciences Paris Saclay – Institut National des Sciences de l’Univers, Université Paris-Saclay, Centre National de la Recherche Scientifique, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR8148, Université Paris-Saclay : UMR8148, Institut National des Sciences de l’Univers : UMR8148 – France

³ Géosciences Paris Saclay – Institut universitaire de France – France

⁴ European Space Astronomy Centre (ESAC) – Camino bajo del Castillo, s/n, Urbanización Villafranca del Castillo, Villanueva de la Cañada, E-28692 Madrid, Espagne

⁵ CentraleSupélec, Université Paris-Saclay, Inria – Centrale Supélec, L’Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique (INRIA), Université Paris Sud, Université Paris Saclay – 3 Rue Joliot Curie, 91190 Gif-sur-Yvette, France

⁶ CentraleSupélec, Université Paris-Saclay, Inria – Centrale Supélec, L’Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique (INRIA), Université Paris Sud, Université Paris Saclay – France

Planetary surfaces undergo continuous transformation driven by geological processes like volcanic eruptions and impacts. Understanding the distribution of impact craters is crucial to have a better comprehension of how planetary surfaces evolve through time (Hartmann & Neukum, Springer, 2001). This research project aims to develop a computer vision algorithm which automatically detect and classify craters from planetary surface images to create a comprehensive database encompassing crater positions, sizes, and their characteristics. The database will serve as a valuable resource for planetary scientists, facilitating the study of relative age, geological features distribution and so on, enabling a deeper understanding of planetary geological history and evolution.

For this work we use high-resolution planetary surface images from the Mars Reconnaissance Orbiter Context camera (CTX) which cover 99.5% of Mars (Dickson & al., LPSC, 2018). We also use an existing crater database listing over 376,000 craters of a size > 1 km in diameter (Lagain & al., Geological Society of America, 2021). Then, we train a Faster R-CNN computer vision algorithm on a subset of images and we tested it on a separate subsets. Our study demonstrated good results comparable to recent literature (Benedix & al., Earth and Space Science, 2020 ; LaGrassa & al., Remote Sensing, 2023), achieving a mean average precision with an Intersection over Union criterion ≥ 0.5 (mAP50) > 0.8 . Regardless of crater size, as long as it exceeds 10 pixels, the algorithm consistently performed well at every latitude (Martinez & al., PSS, under review).

*Intervenant

†Auteur correspondant: leonard.martinez@universite-paris-saclay.fr

Molecular Biomarkers in Secondary Mineral Deposits of Mauna Loa Lava Tubes, Hawaii, as Analogs for Mars: Implications for Martian Habitability and Exploration

Maëva Millan ^{*† 1}, Mathilde Mussetta ^{* ‡ 1}, Dina Bower ², Amy Mcadam ², Christine Knudson ², Cherie Achilles ², Sarah Johnson ³

¹ PLANETO - LATMOS – Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales – France

² NASA Goddard Space Flight Center – États-Unis

³ Georgetown University [Washington] – États-Unis

Martian subsurface terrains such as caves, lava tubes, and deep subsurface environments have been highlighted as protected refuges for both extant life (if present) and the preservation of biosignatures (1). Subsurface basaltic environments are considered to be high priority targets for the future exploration of Mars because of their more constant climatic conditions compared to the surface and reduced exposure to radiation. Thousands of candidate caves and lava tubes have been identified on Mars by orbital imaging and represent plausible locations for hosting microbial life and/or preserving molecular biomarkers (2). On Earth, lava tubes are formed by volcanic processes and undergo a variety of biogeochemical processes and despite the variety of location and conditions where they are found, their relative environmental stability can enhance the formation and preservation of secondary minerals. In these terrains, some secondary mineral deposits are directly driven by biomineralization processes involving communities of microorganisms that thrive underground.

The aim of this study is to assess the habitability potential of the relatively young flows (~200 yrs) at the Mauna Loa volcano, Hawai'i as terrestrial analogs for Mars (3, 4). To do so, we collected samples during two expeditions that occurred in 2019 and 2022 such as basalt and secondary mineral deposits with varying mineralogy, light exposure, and humidity. We are undertaking a comparative biogeochemical study of the samples collected in the tube using a set of complementary techniques. Mineralogical, microbiological, and chemical analyses have been performed using X-Ray powder diffraction, DNA sequencing, gas-chromatography mass-spectrometry, and Raman spectroscopy (5, 6, 7). These last techniques are part of the instrument suites of the current and future martian rovers (e.g., Curiosity, Perseverance, and Rosalind Franklin), thereby enabling us to assess the ability of current flight techniques to detect chemical biosignatures in mineral deposits. Results indicate the presence of a great diversity and abundance of organic molecules in the samples, as well as the presence of molecular biosignatures (e.g., lipids, pigments). Our findings suggest that basaltic lava tubes are promising targets for the search for life on Mars and that biosignatures could be uncovered with techniques similar to those onboard martian rover missions.

*Intervenant

†Auteur correspondant: maeva.millan@latmos.ipsl.fr

‡Auteur correspondant: mathilde.mussetta@latmos.ipsl.fr

References:

- (1) Boston, P. J., et al., 2001, Cave biosignature suites: Microbes, minerals, and Mars. *Astrobiology*, 1(1), 25–55
- (2) Cushing, G.E., et al., 2015, Atypical pit craters on Mars, New insights from THEMIS, CTX, and HiRISE observations. *JGR Planets*, 120, 1023-1043, 2015.
- (3) Northup, D. E., et al., 2011, Lava cave microbial communities within mats and secondary mineral deposits: Implications for life detection on other planets. *Astrobiology*, 11(7), 601–618.
- (4) Weng, M., Zaikova, E., Millan, M., et al., 2022, Life Underground: Investigating Microbial Communities and Their Biomarkers in Mars-Analog Lava Tubes at Craters of the Moon National Monument and Preserve.” *JGR Planets* 127.11: e2022JE007268.
- (5) Fishman, C., et al., 2023, Extreme Niche Partitioning and Microbial Dark Matter in a Mauna Loa Lava Tube, *JGR*: e2022JE007283
- (6) Millan, M., et al., 2022. Organic Molecules in Secondary Mineral Deposits of Mauna Loa Lava Tubes, Hawaii, as Analogs for Mars: Implications for Martian Habitability and Exploration. 44th COSPAR Scientific Assembly. Held 16-24 July, 44, 2776.
- (7) Bower, D., McAdam, A. C., Clayton S. C., Millan, M., et al., 2023, Spectroscopic Comparisons of Two Different Terrestrial Basaltic Environments: exploring potential novel biosignatures, *Icarus*, 402, 115626.

Une Base de Données Climatiques Martiennes : la MCDv6.1

Ehouarn Millour * ¹, Francois Forget * [†], Aymeric Spiga *

², Antoine Bierjon ¹, Thomas Pierron ³, Luca Montabone ^{4,5}, Franck Lefèvre, Franck Montmessin ⁶, Jean-Yves Chaufray ⁷, Marie-Christine Desjean, Fabrice Cipriani ⁸

¹ Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD) – IPSL CNRS Sorbonne Université – France

² Laboratoire de Météorologie Dynamique – Laboratoire de Météorologie Dynamique – IPSL, École Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris, ENS, PSL Research University, Sorbonne, Université Pierre et Marie Curie [UPMC] - Paris VI – France

³ Laboratoire de Météorologie Dynamique (UMR 8539) – CNRS : UMR8539 – France

⁴ Laboratoire de Météorologie Dynamique, IPSL, CNRS, Sorbonne Université, Paris – Laboratoire de Météorologie Dynamique – IPSL, École Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris, ENS, PSL Research University, Sorbonne – France

⁵ Paneureka, Le Bourget-du-Lac – Paneureka, Le Bourget-du-Lac – France

⁶ PLANETO - LATMOS – Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales – France

⁷ LATMOS – CNRS : UMR8190, Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines (UVSQ) – France

⁸ European Space Agency, ESTEC/TEC-EPS (ESTEC) – Pays-Bas

Notre modèle de circulation générale (le Mars Planetary Climate Model, Mars PCM) simule l'environnement atmosphérique de Mars. Il est développé au LMD (Laboratoire de Météorologie Dynamique, Paris, France) en étroite collaboration avec plusieurs équipes en Europe (LATMOS, France, Université d'Oxford, The Open University, l'Instituto de Astrofísica de Andalucía), et avec le soutien de l'ESA (Agence Spatiale Européenne) et du CNES. Les sorties du PCM sont compilées pour construire une base de données du climat de Mars. Cette base de données climatiques de Mars (Mars Climate Database, MCD) a été distribuée au fil des ans à plus de 400 équipes dans le monde et est utilisée aussi bien pour des études d'ingénierie que des travaux scientifiques. La MCD fait partie des "Planetary Climates Databases", labelisé en tant que Service National d'Observation (SNO5) par l'INSU en 2019.

La version actuellement disponible de la MCD est la version 6.1 (voir <http://www-mars.lmd.jussieu.fr>), qui a été finalisée en décembre 2022.

Pour résumer, la MCD donne accès à :

- Des climatologies obtenues pour une série de scénarios synthétiques de poussière : année climatologique, froide (ie : faible quantité de poussière), chaude (ie : atmosphère poussiéreuse) et tempête globale de poussière, le tout combiné à différents forçages solaires dans l'extrême UV (minimum, moyen ou maximum). Ces scénarios ont été dérivés des observations de la poussière des 12 dernières années martiennes.

*Intervenant

[†]Auteur correspondant: forget@lmd.ipsl.fr

- Les valeurs moyennes et statistiques des principales variables météorologiques (température, densité, pression et vents), ainsi que la pression et la température de surface, la couverture de glace de CO₂, les flux radiatifs thermiques et solaires, l'opacité et le rapport de mélange des colonnes de poussière, les colonnes de vapeur et de glace (H₂O), les concentrations de nombreuses espèces : (CO), (O₂), (O), (N₂), (H₂), (O₃), ...
- Un mode haute résolution qui combine la topographie MOLA à haute résolution (32 pixels/degré) et les mesures de pression Insight aux résultats du PCM (obtenus à plus basse résolution spatiale) afin de prédire des valeurs à haute résolution des champs atmosphériques.
- La possibilité de reconstruire des conditions (météorologique) réalistes en combinant la climatologie fournie avec des schémas de perturbations supplémentaires.

La nouvelle réalité de la surveillance des tempêtes de poussière sur Mars

Luca Montabone ^{*† 1,2}

¹ Laboratoire de Météorologie Dynamique, IPSL, CNRS, Sorbonne Université, Paris – Laboratoire de Météorologie Dynamique – IPSL, École Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris, ENS, PSL Research University, Sorbonne – France

² Paneureka, Le Bourget-du-Lac – Paneureka, Le Bourget-du-Lac – France

En utilisant les données des instruments américaines Thermal Emission Spectrometer (embarqué sur le satellite Mars Global Surveyor), Thermal Emission Imaging System (embarqué sur Mars Odyssey) et Mars Climate Sounder (embarqué sur Mars Reconnaissance Orbiter), qui opèrent dans l'infrarouge thermique, nous avons pu reconstruire des cartes diurnes de la profondeur optique de la colonne de poussière couvrant plus de 13 années martiennes. À partir de ces cartes (utilisées, entre autres applications, comme " scenario de poussière " dans la Mars Climate Database), il est possible d'identifier les tempêtes qui atteignent l'échelle régionale et créer une statistique de leurs caractéristiques principales, comme la trajectoire, la surface, et la profondeur optique. Une nouveauté en cours de développement est l'identification et le traçage des tempêtes en utilisant des algorithmes de machine learning non supervisés. Le nouveau satellite des Émirats Arabes Unis (" Hope "), a été mis en 2021 dans une orbite avec basse inclinaison et haute altitude, ce qui permet de surveiller une surface plus importante de la planète simultanément. Ses observations améliorent significativement la qualité de nos cartes de poussière, permettant de surveiller les tempêtes de manière plus continue et sur plusieurs heures locales. L'Agence Spatiale Européenne étudie actuellement un concept de mission spatiale vers Mars en orbite quasi-équatoriale, à une altitude relativement élevée (environ 5720 km), dans le but de la communication, mais cette plateforme aurait également une charge utile dédiée à la surveillance de la météorologie martienne. Cela nous rapproche un peu plus d'une surveillance quasi-globale, continue et simultanée des tempêtes de poussière. C'est le moment opportun pour capitaliser sur l'expertise française dans ce domaine et créer un centre spécifiquement dédié à la surveillance des tempêtes de poussière et de la météorologie martienne en générale.

*Intervenant

†Auteur correspondant: lmontabone@paneureka.org

Mapping recent ice-rich deposits on Mars

Léo Scordia ^{*† 1}, Susan Conway^{‡ 2}, Noé Le Becq ¹

¹ Laboratoire de Planétologie et Géosciences [UMR_C6112] –
–*LeMansUniversit, Universitd' Angers, InstitutNationaldesSciencesdel'Univers, CentreNationaldelaRechercheScie*
UFRdesSciencesetdesTechniques – –France

² Laboratoire de Planétologie et Géosciences
[UMR_C6112] – –*NantesUniversit, UnivAngers, LeMansUniversit, CNRS, CNRS :*
UMR6112 – –France

We systematically mapped recent surface icy units found in impact craters around Alba Mons, Mars (Sinha and Vijayan, 2017) which are thought to have been laid down in the last few millions to tens of millions of years. These deposits have morphologies often expressed by the "latitude dependant mantle" (LDM), and also by Glacier-like forms (GLF - Souness et al. 2012). Their expression and patterns with latitude has never been systematically studied and may reveal several different ice-contents, lags and thicknesses of deposits in different latitude bands. The LDM is known to affect the global topography of Mars (Kreslavsky and Head 2002, 2006) and the ice contained within it could be an important resource for in situ exploration of Mars (Morgan et al. 2021). The LDM is thought to be continuous until 40°N and S as shown by the neutron spectrometer data (e.g. Bandfield and Feldman 2008), observations of thermal contraction polygons (Mangold et al. 2004) and the presence of icy scarps (Dundas et al. 2018). The LDM is thought to be discontinuous from 30-40°N/S due to its morphology (Milliken et al. 2003; Mustard et al. 2001, Conway and Balme 2014; Schon et al. 2009), radar data (e.g. Bramson et al. 2017), and impacts revealing ice in their ejecta at these latitudes (e.g. Byrne et al. 2009).

We used the crater database of Robbins and Hyneck (2012) to map out the deposits found in association with km-scale young impact craters (as evidenced by their depth-diameter ratio and morphology). We used HiRISE, CaSSIS and CTX image datasets to perform the mapping in ArcGIS. Our initial results show an unusual concentration in the youngest icy units on the eastern flank of the volcano, consistent with expected ice depocentres at high obliquity (Madeleine et al. 2009). In selected areas we aim to examine the crater size frequency distribution to understand the potential absolute ages of the units studied (Platz et al. 2013).

References:

Bandfield, J.L., Feldman, W.C., 2008. Martian high latitude permafrost depth and surface cover thermal inertia distributions. *J. Geophys. Res.* 113, E08001.

Bramson, A.M., Byrne, S., Bapst, J., 2017. Preservation of Midlatitude Ice Sheets on Mars: Mars Midlatitude Ice Sheet Preservation. *Journal of Geophysical Research: Planets* 122, 2250–2266. <https://doi.org/10.1002/2017JE005357>

*Intervenant

†Auteur correspondant: E224628L@etu.univ-nantes.fr

‡Auteur correspondant: Susan.Conway@univ-nantes.fr

- Byrne, S., Dundas, C.M., Kennedy, M.R., Mellon, M.T., McEwen, A.S., Cull, S.C., Daubar, I.J., Shean, D.E., Seelos, K.D., Murchie, S.L., Cantor, B.A., Arvidson, R.E., Edgett, K.S., Reufer, A., Thomas, N., Harrison, T.N., Posiolova, L.V., Seelos, F.P., 2009. Distribution of mid-latitude ground ice on Mars from new impact craters. *Science* 325, 1674–1676. <https://doi.org/10.1126/science.1175307>
- Conway, S.J., Balme, M.R., 2014. Decametre-thick remnant glacial ice deposits on Mars. *Geophys. Res. Lett.* 41, 5402–5409. <https://doi.org/10.1002/2014GL060314>
- Dundas, C.M., Bramson, A.M., Ojha, L., Wray, J.J., Mellon, M.T., Byrne, S., McEwen, A.S., Putzig, N.E., Viola, D., Sutton, S., Clark, E., Holt, J.W., 2018. Exposed subsurface ice sheets in the Martian mid-latitudes. *Science* 359, 199–201. <https://doi.org/10.1126/science.aao1619>
- Kreslavsky, M.A., Head, J.W., 2002. Mars: Nature and evolution of young latitude-dependent water-ice-rich mantle. *Geophysical Research Letters* 29, 14–1. <https://doi.org/10.1029/2002GL015392>
- Kreslavsky, M.A., Head, J.W., 2006. Modification of impact craters in the northern plains of Mars: Implications for Amazonian climate history. *Meteorit. Planet. Sci.* 41, 1633–1646.
- Madeleine, J.B., Forget, F., Head, J.W., Levrard, B., Montmessin, F. and Millour, E., 2009. Amazonian northern mid-latitude glaciation on Mars: A proposed climate scenario. *Icarus*, 203(2), pp.390-405.
- Mangold, N., Maurice, S., Feldman, W.C., Costard, F., Forget, F., 2004. Spatial relationships between patterned ground and ground ice detected by the Neutron Spectrometer on Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets* 109, E08001. <https://doi.org/10.1029/2004JE002235>
- Milliken, R.E., Mustard, J.F., Goldsby, D.L., 2003. Viscous flow features on the surface of Mars: Observations from high-resolution Mars Orbiter Camera (MOC) images. *J. Geophys. Res.-Planets* 108, 5057. <https://doi.org/10.1029/2002JE002005>
- Morgan, G.A., Putzig, N.E., Perry, M.R., Sizemore, H.G., Bramson, A.M., Petersen, E.I., Bain, Z.M., Baker, D.M.H., Mastrogiuseppe, M., Hoover, R.H., Smith, I.B., Pathare, A., Dundas, C.M., Campbell, B.A., 2021. Availability of subsurface water-ice resources in the northern mid-latitudes of Mars. *Nat Astron.* <https://doi.org/10.1038/s41550-020-01290-z>
- Mustard, J.F., Cooper, C.D., Rifkin, M.K., 2001. Evidence for recent climate change on Mars from the identification of youthful near-surface ground ice. *Nature* 412, 411–414. <https://doi.org/10.1038/350865>
- Platz, T., Michael, G., Tanaka, K.L., Skinner, J.A., Fortezzo, C.M., 2013. Crater-based dating of geological units on Mars: Methods and application for the new global geological map. *Icarus* 225, 806–827. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2013.04.021>
- Robbins, S.J., Hynes, B.M., 2012. A new global database of Mars impact craters ≥ 1 km: 1. Database creation, properties, and parameters. *J. Geophys. Res.* 117. <https://doi.org/10.1029/2011JE003966>
- Sinha, R.K. and Vijayan, S., 2017. Geomorphic investigation of craters in Alba Mons, Mars: Implications for Late Amazonian glacial activity in the region. *Planetary and Space Science*, 144, pp.32-48.
- Schon, S.C., Head, J.W., Milliken, R.E., 2009. A recent ice age on Mars: Evidence for climate oscillations from regional layering in mid-latitude mantling deposits. *Geophys. Res. Lett.*

36. <https://doi.org/10.1029/2009GL038554> Willmes, M., Reiss, D., Hiesinger, H., Zanetti, M., 2012. Surface age of the ice–dust mantle deposit in Malea Planum, Mars. *Planetary and Space Science* 60, 199–206. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2011.08.006>
- Souness, C., Hubbard, B., Milliken, R.E. and Quincey, D., 2012. An inventory and population-scale analysis of martian glacier-like forms. *Icarus*, 217(1), pp.243-255.

The evolution of Pliva Vallis, the outlet valley of the Jezero's crater lake on Mars

Justine Villette ^{*} ¹, Nicolas Mangold ¹, Laetitia Le Deit ¹, Susan Conway ¹,
Edwin Kite ²

¹ Laboratoire de Planétologie et Géosciences
[UMR_C6112] – *NantesUniversité, Univ Angers, LeMansUniversité, CNRS, CNRS :*
UMR6112 – France

² University of Chicago, Chicago, IL, USA – États-Unis

On Mars, geological observations obtained in situ and from orbit have revealed past surface water activity. Such observations have suggested that Jezero crater hosted a paleolake that was fed by two inlet valleys. This paleolake is currently being explored by the Perseverance rover, a part of the NASA's Mars 2020 mission. This site is of interest for understanding ancient martian hydrologic activity, and for finding potential traces of past life. An outlet valley is present on the eastern rim raising the question of whether the lake system operated mainly as an open basin, or as a closed basin system with periodic overflows. Resolving this uncertainty would improve our understanding of the lake's evolution and its geochemistry.

To tackle this uncertainty, we first perform a qualitative morphological study of the outlet valley using digital elevation models and orbital images (CTX and HiRISE data). Interpretations of imaging and topographic data of the outlet valley allowed us to propose a scenario for lake evolution and constrain the valley activity. Indeed, the valley's atypical morphology (e.g., decrease in width downstream) and the presence of reincised fluvial sedimentary deposits, perched valleys and bedrock incision terraces lead us to interpret this valley as a discontinuous and temporary overflow valley. Thanks to all of these observations we can propose a scenario of lake overflow in four different breach episodes, responsible for the progressive and discontinuous incision of the valley. The Jezero's crater lake would thus be a closed basin which would have opened periodically during the four breach erosion events.

To give a first estimate of the duration of these four episodes of lake overflow and valley incision, we use a 0-D mathematical model, simulating a valley formation by breach erosion process (1, 2). This model provides a simple simulation of breach formation and particles transport in the outlet valley during time. Considering the imposed assumptions (e.g., slope, grainsize, no change in the geometry of the valley during one episode, etc.), we have simulated the four overflow episodes identified. These results suggest that each flooding and incision of the outlet valley would have occurred in less than a few weeks, or even a few days for some episodes, which confirm that a discontinuous and episodic flow for this valley is a plausible scenario.

(1) Holo, Samuel J., et Edwin S. Kite. " Dynamics of Mars lake-overflow valley incision ", Vol. 50, 2019.

(2) Warren, A.O., S. Holo, E.S. Kite, et S.A. Wilson. " Overspilling Small Craters on a Dry

*Intervenant

Mars: Insights from Breach Erosion Modeling ". *Earth and Planetary Science Letters* 554 (janvier 2021): 116671.

Comprehensive analysis of the alteration of Tyrrhena Terra: Implications for source-to-sink processes on Mars

Yuchun Wu ^{*† 1,2,3}, Nicolas Mangold ², Yang Liu ^{1,3,4}, John Carter ⁵, Xing Wu ¹, Lu Pan ⁶, Qian Huang ⁷, Yongliao Zou ¹

¹ State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing – Chine

² Laboratoire de Planétologie et Géosciences UMR 6112, Nantes – Nantes Université, Univ Angers, Le Mans Université, CNRS, CNRS : UMR6112 – France

³ College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing – Chine

⁴ Center for Excellence in Comparative Planetology, Chinese Academy of Sciences, Hefei – Chine

⁵ Institut d’astrophysique spatiale – CNRS, Université Paris Saclay - Faculté des sciences d’Orsay – France

⁶ Deep Space Exploration Laboratory/Laboratory of Seismology and Physics of Earth’s Interior, School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei – Chine

⁷ Hubei Subsurface Multi-scale Imaging Key Laboratory, School of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan – Chine

Tyrrhena Terra, located in the cratered Noachian highlands between Hellas and Isidis Planitia of Mars, is a key region for understanding the planet’s early aqueous environment due to its rich and diverse hydrated minerals, predominantly phyllosilicates. Previous research has largely focused on mineral formations within local impact craters, particularly the complex mineral assemblages found in central peaks. Despite extensive studies on the mineralogy and alteration, the influence of varying scale of local impact events on the formation and distribution of these minerals has not yet been fully understood.

In this study, we conducted a comprehensive survey of hydrated mineral outcrops in Tyrrhena Terra using spectral analysis and high-resolution imaging. We aim to assess the relationship between the size and degradation rate of impact craters and the diversity of hydrated minerals present. With aqueous outcrop locations systematically categorized by crater diameter and degradation rate, we discovered a significant increase in mineral diversity within larger, less degraded craters, even when excluding minerals on central peaks. This reveals variations in subsurface composition with depth, where post-impact hydrothermal deposits are predominantly found in central peaks, thus minimizing the influence of impact-driven hydrothermalism.

Notably, Fe/Mg-smectites were prevalent not only in ancient sediments that are incised by valley networks and isolated from impacts, but also in exposures of small craters (less than 5 km in diameter) or by highly degraded larger craters (greater than 20 km). In contrast, the interiors of large, well-preserved craters exhibit a complex diversity of minerals, including those formed under relatively high temperatures, such as prehnite and zeolite. This suggests that mineral

*Intervenant

†Auteur correspondant: yuchun.wu@univ-nantes.fr

transformations involve processes beyond only impact events.

Our findings highlight a regional source-to-sink geological process where minerals were transformed and redistributed. These minerals are excavated by local impacts, subsequently altered by surface weathering processes, and transported through fluvial activity to their present locations. This suggests that more than one period of hydrated alteration was active in early Martian history, likely predating the formation of widespread valley networks, with each period lasting long enough for hydrated minerals to be formed or altered. This research offers new insights into the early Martian aqueous history and its past environmental conditions.

Quantitative Mineral Analysis of Zhurong Landing Area Based on In-situ SWIR Spectral Unmixing

Zhou Xiang^{* 1,2}, Liu Yang^{† 1}, Wu Xing¹, Zou Yongliao¹

¹ State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190 – China

² University of Chinese Academy of Sciences – Beijing 100049, China

In recent years, extensive orbital VNIR spectroscopic data obtained by instruments such as OMEGA and CRISM have significantly advanced our understanding of Martian geology and climate evolution. However, prior to the missions of the Zhurong and Perseverance rovers, *in situ* near-infrared hyperspectral measurements had not been conducted on Mars.

In May 2021, China’s Tianwen-1 mission successfully landed the Zhurong rover on the Amazonian unit in the southern region of Utopia Planitia on the Mars and obtained Short Wavelength Infrared (SWIR) spectra of the landing site surface ranging from 0.85 to 2.4 μm . Initial analysis of OMEGA data covering Zhurong’s landing site did not reveal significant hydrated mineral features. However, qualitative analysis of the SWIR spectra obtained by the Zhurong rover revealed distinct absorption features near ~ 1.45 , 1.95 , and $2.23 \mu\text{m}$, suggesting the possible presence of hydrated sulfates or silicates on the surface of the landing area, indicating that water activity during the Amazonian era may have been more active than previously thought. At present, SWIR spectra still lack further quantitative analysis.

The SWIR spectra obtained by Zhurong for each site are actually mixed spectra, containing multiple components. The mineral abundances can be quantitatively obtained through unmixing the reflectance spectra, which is beneficial for better interpretation of material composition at the Zhurong landing area. We employed a linear unmixing approach, combined the Hapke model and Markov Chain Monte Carlo algorithm, quantitatively retrieving the abundance, size and uncertainty of minerals on the surface of Zhurong’s landing area. Considering common minerals on Mars, we selected olivine, pyroxene (both high-calcium and low-calcium), plagioclase, and basaltic glass as the basis for spectral endmembers. By comparing the absorption features of SWIR spectra, we also added opal and two types of sulfates (gypsum and epsomite) into endmembers.

The unmixing results indicate that the mineral composition is dominated by primary minerals. Among the hydrated minerals, the volume abundance of opal is ~ 3 -10 vol%, gypsum is approximately 1-4 vol%, and epsomite is ~ 3 -7%. The low abundance of hydrated minerals implies weak chemical alteration. Hydrated minerals were detected in all detection site along the Zhurong rover’s traverse path, spanning an approximate two-kilometer area, suggesting that water activity in the landing area is not confined to a small area. The unmixing results for different

*Intervenant

†Auteur correspondant: yangliu@nssc.ac.cn

landforms are similar. This may be related to the fact that the surfaces of these landforms are all covered by a similar layer of regolith or pervasive dust. These quantitative unmixing results enable improved quantification of surface hydration levels, further enhancing our understanding of the climate and the aqueous history during the Amazonian era.

Pitted cones in the late Hesperian lowland unit on Mars: Implications and Insights

Chaolin Zhang ^{*† 1,2,3}, Susan Conway ³, Yang Liu ²

¹ University of Chinese Academy of Sciences [Beijing] – Chine

² National Space Science Center [Beijing] – Chine

³ Laboratoire de Planétologie et Géosciences

[UMR_C6112] – –*NantesUniversit, UnivAngers, LeMansUniversit, CNRS, CNRS* :
UMR6112 – –France

As part of the Tianwen-1 mission (TW-1), the Zhurong rover successfully landed in the late Hesperian lowland unit in southern Utopia Planitia. Previous studies in this region have identified widespread occurrence of pitted cones, cone-shaped landforms with depressions at the top. However, the limited coverage of CRISM spectral data and particularly high dust cover pose challenges for spectral analysis to constrain the composition of pitted cones in this region. In our study, we selected a 10°×20° region in southern Utopia Planitia and included more examples of pitted cones to better understand their morphological characteristics, spatial distribution patterns, and regional variations. Additionally, by integrating data from the Zhurong rover's in-situ exploration and higher-resolution color images (HiRISE and CaSSIS), we are exploring new approaches for analyzing the material composition of pitted cones. This ongoing study is expected to provide new insights into the morphology, evolution, and material composition of pitted cones, ultimately helping to constrain the geological evolution of southern Utopia Planitia since the late Hesperian period.

*Intervenant

†Auteur correspondant: zhangchaolin20@mails.ucas.ac.cn

Optimizing adsorbent selection and adsorption-desorption conditions for the DraMS-GC injection traps of the Dragonfly mission

Alex Abello ^{*† 1}, Caroline Freissinet ¹, Cyril Szopa ¹, Théo Govekar ¹

¹ Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales – LATMOS/IPSL, Sorbonne université, UVSQ Université Paris-Saclay, CNRS – France

In the coming years, space probes will be sent to the surface of ocean worlds of the solar system such as Titan, Europa and Enceladus to characterize their habitability and search for traces of life. In particular, the Dragonfly mission which was confirmed in June 2019 is expected to launch in 2028 and to land on Titan in 2034. During my thesis, I will take part in the development of the gas chromatograph that will be included on Dragonfly. This instrument (named DraMS-GC) includes injection traps which are meant to focus the sample's components before releasing them all at once into the chromatographic column where they will be separated. I will select the chemical adsorbents to be used in those traps and optimize the focusing and releasing conditions to ensure the best possible efficiency within the mission constraints. This poster will include preliminary results on this study.

*Intervenant

†Auteur correspondant: alex.abello@latmos.ipsl.fr

Modelling the climate in Titan's lake regions

Audrey Chatain ^{*† 1}, Enora Moisan ^{1,2}, Léa Bonnefoy ², Scot Rafkin ³,
Alejandro Soto ³

¹ LATMOS – CNRS, Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines (UVSQ), Université Pierre et Marie Curie [UPMC] - Paris VI – France

² LMD – Université Pierre et Marie Curie [UPMC] - Paris VI, CNRS – France

³ SwRI – États-Unis

Titan, the largest moon of Saturn, interestingly has many similarities with the Earth. It has a thick atmosphere, made mostly of dinitrogen, and a surface pressure of 1.5 bar. It also hosts a hydrological cycle similar to the water cycle on Earth, but based on methane because of the very low surface temperature (-180°C). We then observe similar landscapes and weather processes as on Earth: clouds, rain, rivers, lakes, seas... We gathered many observations of Titan with the Cassini-Huygens mission in 2004-2017. However, the conditions at its surface are still mostly a mystery. How strong are the winds? What are the variations of the surface methane humidity? How frequent are clouds? What is their distribution in size? How frequent is rain? The NASA Dragonfly mission will explore Titan's surface with a giant drone in the 2030s. It will have many meteorological sensors to probe the weather on Titan. Nevertheless, we also need to have an idea of the conditions before then, to prepare the drone and the instruments!

For this purpose, we are developing a mesoscale climate model of the lower troposphere and the surface of Titan. This model is based on the WRF (Weather Research and Forecasting) model developed by NCAR for Earth weather predictions. We call it mtWRF ("mesoscale Titan WRF"). To adequately reproduce the methane cycle, we start by focusing on the evaporation of methane from lakes and its transport by local winds. We made several studies on the climate around a lake on Titan, improving step by step the model, with focuses on the cooling effect of lake evaporation (Rafkin & Soto 2020), the diurnal influence of radiations (Chatain et al 2022), the effect of lake shape and groups of lakes (Chatain et al 2024), and the effect of surface properties and topography (Moisan et al, in rev., detailed in another abstract).

These works showed that lakes cool down by evaporating methane into the atmosphere. This creates a very stable, moist and cold marine layer above the lake. Winds are very small over the lakes, but breezes form on the shore from the differential horizontal air temperature, blowing from the lake to the land. Their intensity and horizontal extent vary diurnally with the insolation. The lake breezes are also affected by background large-scale winds, nearby lakes and topography.

Recently, we started to compute the climate above selected regions of Titan, including realistic lake distribution and topography. We are exploring the seasonality of winds, methane evaporation rate, humidity and temperatures in these selected zones. These results will help us understand the general absence of waves on lake observations, the possibility of fog in the depressions and the quantity of methane evaporated from the lakes into the atmosphere.

*Intervenant

†Auteur correspondant: audrey.chatain@latmos.ipsl.fr

Etude des paramètres empiriques d'élargissement des raies du méthane dans les ailes lointaines

Thibaud Cours * ¹, Issa Hussein-Bassia ¹, Pascal Rannou ¹

¹ Groupe de spectrométrie moléculaire et atmosphérique, Université de Reims Champagne-Ardenne – UMR CNRS 7331 – France

Titan a une atmosphère composée principalement d'azote et de méthane et est entièrement recouverte d'une couche de brume photochimique optiquement épaisse. La brume est produite par la dissociation du méthane et de l'azote. Le méthane et la brume déterminent, entre autres l'équilibre climatique, la formation des nuages et toute la météorologie, mais nous empêchent également de voir clairement la surface. Ce dernier point est le sujet de cette étude.

Il est bien connu que dans les fenêtres spectrales (principalement celles du méthane) il est possible de voir clairement la surface. Cependant, la brume diffuse la lumière et brouille l'image de cette surface, et de plus, même dans les fenêtres, le méthane a une opacité résiduelle modifiant la forme de ces fenêtres et modifiant l'albédo de surface pouvant être obtenu à partir de la photométrie. La forme des fenêtres est due à des effets quantiques prises en compte empiriquement dans le calcul de l'opacité produite par chaque raie individuelle (élargissement des raies par le profil spectral de Voigt plus un "cut-off" des ailes lointaines). Dans le cas le plus simple, seuls deux paramètres sont utilisés pour prendre en compte cet effet : d'une part $\Delta = | - 0 |$ indiquant à quelle distance (en nombre d'onde) du centre de la raie (de nombre d'onde 0) on applique le cut-off et d'autre part σ indiquant comment le profil spectral diminue au-delà du cut-off.

Il s'agit d'un problème connu depuis environ deux décennies et qui n'a pas encore trouvé de solution véritablement satisfaisante. Pour ce travail, nous proposons d'étudier la forme des fenêtres du méthane en nous concentrant sur les spectres de Titan observés dans les zones où la surface n'a pas d'influence, c'est-à-dire au niveau ou à proximité du limbe de Titan. Dans ces régions, l'intensité observée par les instruments optiques dépend uniquement de la brume et du méthane. Dans un premier temps, nous modélisons l'intensité observée par le spectro-imageur VIMS/Cassini et déterminons les propriétés de la brume (profil vertical, propriétés spectrales) en plusieurs endroits du centre du disque de Titan, à une heure donnée et à une latitude donnée, avec nos modèles déjà bien testés pour ce type d'observations. Alors, comme l'atmosphère de Titan est supposée invariante en longitude, on peut utiliser les propriétés de l'atmosphère acquises au centre du disque de la planète pour des observations au limbe. Pour cela nous utilisons un modèle de type Monte Carlo, beaucoup plus lent, mais capable d'effectuer des calculs au limbe. Avec ce modèle, nous utilisons les 2 paramètres Δ et σ et nous tentons de définir, séparément pour chaque fenêtre, ces paramètres qui rendent mieux compte des observations. Nous commençons à travailler avec les fenêtres à 1.6 et 2 μm qui sont les plus importantes pour comprendre Titan.

*Intervenant

Le spectromètre de masse de Dragonfly : une symphonie instrumentale pour révéler la chimie azotée de Titan.

Caroline Freissinet * 1

¹ Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales – Laboratoire Atmosphères, Observations Spatiales (LATMOS), Université Versailles St-Quentin, UPMC Université Paris 06, CNRS, LATMOS, 11 Boulevard d’Alembert, 78280 Guyancourt, France – France

Titan nous offre une fenêtre unique sur une chimie organique extrêmement complexe et abondante, initiée en haute atmosphère par les radiations solaires et les particules énergétiques de la magnétosphère de Saturne, et qui sédimente et s’accumule en surface du satellite. Les produits finaux sont des aérosols organiques présents en très grande quantité. Les données de Cassini et les études de laboratoire ont prédit et montré l’incorporation de grandes quantités d’azote dans ces molécules, et notamment la présence de composés azotés prébiotiques comme des amines, nucléobases et possiblement des acides aminés. Ce type de molécules est d’un intérêt particulier étant donné leur ubiquité dans les systèmes biochimiques terrestres, ainsi que leur rôle redox dans les voies énergétiques. Une fois déposé en surface, le matériel organique solide peut être exposé à des conditions géophysiques permettant une évolution chimique au-delà de la population générée dans l’atmosphère. Particulièrement, certains composés organiques pourraient avoir été en contact avec de l’eau liquide transitoire au niveau de cratères d’impacts ou de potentielles régions cryovolcaniques.

Un des objectifs majeurs de Dragonfly est de mesurer la composition chimique du matériel de surface de Titan sur des terrains variés comme des dunes ou des cratères d’impact. La payload instrumentale de Dragonfly inclut l’instrument Dragonfly mass spectrometer (DraMS), qui peut opérer dans un mode de chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (GC-MS) et de désorption laser couplée à la spectrométrie de masse (LD-MS). Ces deux techniques d’analyses complémentaires combinées permettent la détection et l’identification de composés dans une grande gamme de masses et de fonctions chimiques.

Nous démontrons en laboratoire les capacités de DraMS à détecter les composés chimiques d’intérêt pour la chimie prébiotique, avec une emphase particulière sur les composés azotés. Nous présenterons également des analyses en laboratoire sur des analogues de Titan synthétisés en laboratoire et qui démontrent la complexité attendue des organiques sur cette lune.

*Intervenant

A spherical & heterogeneous radiative transfer code for near-infrared remote sensing: application to Titan

Zili He ^{*† 1}, Sandrine Vinatier ¹, Vincent Eymet ², Vincent Forest ², Bruno Bézard ³, Pascal Rannou ⁴, Sébastien Rodriguez ⁵, Emmanuel Marcq ⁶, Richard Fournier ⁷, Stéphane Blanco ⁷, Nada Mourtaday ⁷, Yaniss Nyffenegger-Pere ⁷, Sébastien Lebounois ⁸, Anni Määttänen ⁹

¹ LESIA – Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, Université Paris Cité, 5 place JulesJanssen, 92195 Meudon, France – France

² Méso-Star – Méso-Star – France

³ LESIA – Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, Université Paris Cité, 5 place JulesJanssen, 92195 Meudon, France – France

⁴ GSMA – UMR CNRS 6089, Université de Reims Champagne-Ardenne, France – France

⁵ Institut de Physique du Globe de Paris – Université de Paris, CNRS, Paris, France – France

⁶ LATMOS/IPSL – UVSQ Université Paris-Saclay, Sorbonne Université, CNRS, Guyancourt, France – France

⁷ Laboratoire Plasma et Conversion d’Energie – UMR-CNRS 5213, Université Paul Sabatier, Toulouse – France

⁸ Laboratoire de Météorologie Dynamique – UMR 8539, IPSL, Sorbonne Université, CNRS, Paris, France – France

⁹ LATMOS/IPSL – Sorbonne Université, UVSQ Université Paris-Saclay, CNRS, Paris, France – France

The Cassini mission has gathered extensive near-infrared spectra and imagery of Titan, which pose challenges for analysis due to the significant scattering effects of its atmosphere with potential heterogeneous radiative properties. Traditional radiative transfer models used to analyze Cassini data often employ plane-parallel or pseudo-spherical approximations and assume that atmospheric layers are horizontally uniform. To address these limitations, a new radiative transfer code that solves a spherical and heterogeneous model based on the Monte Carlo method has been developed (1).

This new radiative transfer solver takes into account the geometry of a "ground" of arbitrary shape, described by a triangular mesh, with the possibility of using an arbitrary number of materials. The radiative properties of a gas mixture are provided on a tetrahedral mesh using the k-distribution spectral model. The radiative properties of an arbitrary number of aerosols and clouds can also be provided on their individual meshes.

Furthermore, to retrieve atmospheric (e.g., haze density, top of cloud altitude, etc.) or surface properties, not only the intensity but also its gradient (the so-called sensitivities) are needed. Since these gradient calculations cannot be done with finite differences with the Monte Carlo approach, we need to differentiate the Monte Carlo estimator of intensity to build the Monte Carlo

*Intervenant

†Auteur correspondant: zili.he@obspm.fr

estimator of sensitivities. By conserving the same random paths for the estimation of intensity and all sensitivities, the extra calculation time to estimate all these quantities is minimized. A vectorized Monte Carlo estimator is then built, which can estimate simultaneously the intensity and its gradient. Currently, the estimation of sensitivities of mixed gas radiative properties is not available because of its complexity, which needs further development.

The methodology is applied to Titan's atmosphere, where we perform sensitivity analysis. Because of the strong scattering effect in the atmosphere, the heterogeneity of the surface and atmosphere impacts a lot of the observable (i.e., the measured intensity), which cannot be investigated by classical parallel-plane and homogeneous layers radiative transfer solvers. For instance, we show that at around 933 nm, the surface reflectivity at 250 km away from the targeting point still has an unnegligible effect on the measured signal. Similarly, sensitivity analysis is also performed on the aerosol density in the atmosphere. These sensitivity analyses help understand the scattering effect in Titan's atmosphere and help design the inversion process of atmospheric properties.

(1) htrdr, Meso-Star <https://www.meso-star.com/projects/htrdr/htrdr.html>

Investigation expérimentale du dégazage et des caractéristiques chimiques des aérosols photochimiques organiques de Titan et d'exoplanètes

Orlène Kinsumuna Hondi * ¹, Audrey Chatain ², Louis Maratrat ³, Ludovic Vettier ⁴, Oriane Sohier ⁵, Caroline Freissinet ⁶, Thomas Gautier ^{1,7}

¹ PLANETO - LATMOS – Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines (UVSQ) – France

² LATMOS – CNRS, Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines (UVSQ), Université Pierre et Marie Curie [UPMC] - Paris VI – France

³ PLANETO - LATMOS – Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines (UVSQ) – France

⁴ Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales – Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines : UMR8190, Institut national des sciences de l'Univers : UMR8190, Sorbonne Université : UMR8190, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR8190, Institut National des Sciences de l'Univers : UMR8190, Institut national des sciences de l'Univers : UMR8190, Institut national des sciences de l'Univers : UMR8190, Institut national des sciences de l'Univers : UMR8190 – 11 boulevard d'Álembert Quartier des Garennes 78280 - Guyancourt, France

⁵ PLANETO - LATMOS – Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales – France

⁶ Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales – LATMOS/IPSL, Sorbonne université, UVSQ Université Paris-Saclay, CNRS – France

⁷ Laboratoire d'études spatiales et d'instrumentation en astrophysique – Institut National des Sciences de l'Univers, Observatoire de Paris, Université Paris sciences et lettres, Sorbonne Université, Centre National de la Recherche Scientifique, Université de Paris – France

Les atmosphères planétaires possèdent toutes des aérosols, des particules solides ou liquides en suspension dans l'air. Ces derniers affectent fortement le climat. Ils ont la capacité d'impacter le bilan radiatif d'une planète en fonction de leur composition et de leur taille, ainsi qu'influencer la formation de nuages dans l'atmosphère en agissant comme noyaux de condensation.

Sur Titan, les radiations UV provenant du soleil ainsi que les particules énergétiques issues de la magnétosphère de Saturne, créent un environnement propice à la formation d'aérosols organique par réactions photochimiques complexes. Ce satellite se démarque par la présence d'une brume stratosphérique avec des quantités abondantes d'aérosols. En parallèle, l'arrivée du télescope spatial James-Webb (JWST) représente un tremplin concernant l'étude des atmosphères des exoplanètes. Notre intérêt se porte vers les systèmes retrouvés en zones habitables dont la composition atmosphérique permet la formation d'aérosols organiques (c'est à dire, très peu ou pas oxydées).

Pour mieux comprendre le climat de Titan et des exoplanètes possédant des aérosols photochimiques, nous avons réalisé deux études au laboratoire.

Premièrement, nous avons produit et caractérisé des analogues d'aérosols (nommés 'tholins')

*Intervenant

provenant de Titan et de différents types d'exoplanètes. Cette expérience nous a permis de comprendre comment les différentes compositions de ces atmosphères affectent les propriétés physiques et chimiques des aérosols qui s'y forment, et qui peuvent alors avoir des effets différents sur le climat. Les tholins sont produits avec le réacteur à plasma froid PAMPRE du LATMOS, simulant la chimie ionique des hautes atmosphères. Nous avons simulé Titan avec un mélange de gaz N₂-CH₄, et des exoplanètes avec un mélange gazeux N₂-CH₄-CO₂ ou H₂-CH₄. Nous avons identifié les espèces volatiles formées lors de l'expérience par spectrométrie de masse, puis nous avons récolté les aérosols solides déposés au fond. Nous avons déterminé leur structure moléculaire par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) ainsi que par pyrolyse couplée à la chromatographie en phase gazeuse et la spectrométrie de masse (Pyr-GC-MS). Nous avons constaté que les tholins ont des compositions complexes et diversifiées, influencées par la présence de N₂ et de CO₂. Ces deux éléments jouent un rôle crucial dans la formation de divers groupes fonctionnels et des liaisons chimiques. L'absence du N₂ et son remplacement par l'H₂ réduit la synthèse de composés organiques complexes.

Lors de cette première étude nous avons remarqué que les tholins dégazent des molécules volatiles lorsqu'ils viennent d'être formés. C'est pourquoi nous avons ensuite mis au point une nouvelle expérience nommée DAEV (Dégazage d'Aérosol sous Environnement Variable) pour étudier le dégazage. Nous avons inséré des tholins fraîchement produits dans une atmosphère inerte d'argon et avons suivi l'évolution de la phase gazeuse par spectrométrie de masse. Nous avons observé la formation de molécules telles que HCN et NH₃ au cours du temps, témoignant d'un dégazage effectif des tholins.

Mots-clés : Aérosols organiques, Aérosols photochimiques, Tholins, Titan, Exoplanètes, Simulation au laboratoire.

Schumann Resonances as a tool to constrain Titan's internal ocean: Re-assessment of Huygens observations and preparation of the EFIELD/Dragonfly experiment

Alice Le Gall ^{*} ¹, Paul Lagouanelle ²

¹ Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales – CNRS, Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines (UVSQ) – France

² Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales – Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, Institut National des Sciences de l'Univers, Sorbonne Université, Centre National de la Recherche Scientifique – 11 boulevard d'Alembert Quartier des Garennes 78280 - Guyancourt, France

Several lines of evidence suggest the presence of an internal global ocean on Titan (e.g., Baland et al., 2011, Iess et al., 2012). Among them, is the detection of a Schumann-like resonance (SR) by the Permittivity, Wave and Altimetry (PWA) analyzer on board the Huygens' probe (Béghin et al., 2012). SR are ELF (Extremely Low Frequency) electromagnetic waves resonating between two electrically conductive layers. On Titan, the electric signal observed at 36 Hz by PWA was interpreted to be the result of Saturn's magnetosphere exciting Titan's SR, with the ionized atmospheric layer (60–70 km altitude) serving as the top of the resonant cavity and a subsurface layer (55–80 km depth), presumably salty liquid water, as the lower boundary. While this detection is still subject to debate (Lorenz and Le Gall, 2020), the next mission to Titan, Dragonfly (NASA), will embark an electrical-field sensor, EFIELD/DraGMet, able to detect at least three harmonics of SR, if any (Barnes et al., 2021). Such detection would place new and more robust constraints on the buried ocean (in particular on its depth) and would therefore be key to better assess Titan's habitability.

In this work we will present the numerical model we have developed to simulate Titan's electromagnetic cavity. We will show the effect on SR characteristics (resonant frequencies and associated quality factors) of the cavity geometry and in particular of the ocean depth. We used this model to re-assess Huygens's PWA observations and found constraints on the ocean depth different from the ones published in Béghin et al. (2012) which were based on an analytical model. Lastly, we will show possible outcomes from future EFIELD measurements.

References:

Baland, R.-M., Van Hoolst, T., Yseboodt, M., & Karatekin, Ö. (2011). Titan's obliquity as evidence of a subsurface ocean? *Astronomy & Astrophysics*, 530, A141. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201116578>

Barnes J., Turtle E., Trainer M., Lorenz R., Mackenzie S., Brinckerhoff W., Cable M., Ernst

*Intervenant

C., Freissinet C., Hand K., Hayes A. et al., Science Goals and Objectives for the Dragonfly Titan Rotorcraft Relocatable Lander, *The Planetary Science Journal*, IOP Science, 2021, 2 (August), 130 (18pp). [10.3847/psj/abfdcf](https://doi.org/10.3847/psj/abfdcf)

Béghin, C., Randriamboarison, O., Hamelin, M., Karkoschka, E., Sotin, C., Whitten, R.C., Berthelier, J.-J., Grard, R., Simões, F., 2012. Analytic theory of Titan's Schumann resonance: Constraints on ionospheric conductivity and buried water ocean. *Icarus* 218, 1028–1042.

Iess, L. et al., 2012. The tides of Titan. *Science* 337, 457.

Lorenz R. and Le Gall A., Schumann resonance on Titan: A critical Re-assessment, *Icarus*, Elsevier, 2020, 351 (November), pp.113942

Modeling Titan’s methane cycle at regional scales

Enora Moisan * ^{1,2}, Audrey Chatain ³, Aymeric Spiga ⁴, Scot Rafkin ⁵,
Alejandro Soto ⁵

¹ LMD – Université Pierre et Marie Curie [UPMC] - Paris VI, CNRS – France

² LATMOS – CNRS, Université de Versailles-Saint Quentin en Yvelines, Université Pierre et Marie Curie [UPMC] - Paris VI – France

³ LATMOS – CNRS, Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines (UVSQ), Université Pierre et Marie Curie [UPMC] - Paris VI – France

⁴ LMD/IPSL – CNRS, Sorbonne Université, CNRS : UMR8539 – France

⁵ SwRI – États-Unis

Titan’s methane cycle is similar to the Earth’s water cycle in many ways. At the surface, methane lakes and seas evaporate, while higher in the troposphere methane clouds form and precipitate. Our knowledge on Titan’s surface and clouds mostly comes from the Cassini-Huygens mission (2004-2017), which collected a huge amount of data, including many images, and a sounding profile through the atmosphere. While awaiting for the next in situ mission to Titan (Dragonfly, NASA, to be launched in 2028), models are a necessary tool to continue to explore the mysteries of Titan’s methane cycle.

Modeling the methane cycle has already been performed at several scales: at planetary level, with global circulation models (e.g. Lora et al. 2019); at regional and local scales to study the local dynamics (e.g. Chatain et al. 2024), and at clouds scale. Methane convective clouds have been modeled in 2D (e.g. Barth and Rafkin 2010), and a methane thunderstorm has been reproduced in 3D (Hueso and Sánchez-Lavega 2006). Nevertheless, many questions remain. Here we focus on regional scales: on lakes and on clouds. How are lakes included in the methane cycle? What is the impact of lake morphology and of the surface properties around them? How do storm clouds form in the troposphere? How do they sometimes become global storms? How much rain do they produce, and how often?

To tackle these questions, we first used a regional model called mtWRF (Rafkin and Soto 2020), and we studied the effect of changing the surface properties around a lake, namely the roughness, emissivity, albedo and thermal inertia (Moisan et al, in rev.). We find that these surface properties only have a minor impact on the atmospheric circulation created by the lake. Indeed, the shape of the atmospheric circulation seems to always remain the same: a thermally direct circulation, with a breeze flowing from the lake to the land at the surface. Adding topography does not change the global shape of the lake breeze either, but it creates a deeper moist layer above the lake, and increases the injection of methane in the atmosphere. One of the main perspectives of this study would be to add wetlands around the lake, as land is expected to be soaked with methane there.

In our regional model around a lake, the condensation of methane in the atmosphere is not allowed, thus clouds cannot form. To study cloud formation, we develop a convection resolving

*Intervenant

model. It is a coupled model with a dynamical core based on a modified version of WRF, and physical schemes that derive from those developed for the global circulation model Titan PCM (de Batz de Trenquellion et al. 2023). In these physical schemes the microphysics of haze and clouds is implemented, enabling the formation of clouds and precipitations.

Brume et brouillard de Titan observés par Nirpsec/JWST, par VIMS/Cassini et comparaison avec le PCM Titan (de l'IPSL)

Pascal Rannou * ¹, Bruno Bézard , Emmanuel Lellouch , Sébastien Rodriguez , Maël Es-Sayeh , Robert West , Bruno De Batz De Trenquelléon , Connor Nixon

¹ Groupe de spectrométrie moléculaire et atmosphérique (U. Reims) – Université de Reims - Champagne Ardenne – France

La couche d'aérosols photochimiques et de brume de condensation (brouillard dans la basse stratosphère et la troposphère) qui recouvre entièrement Titan joue un rôle dominant dans son climat. Ces brumes déterminent le bilan radiatif de l'atmosphère et constituent également un bon traceur de la circulation atmosphérique. La caractérisation spatiale et temporelle des brumes est donc essentielle pour comprendre le climat de Titan. C'est également une étape importante pour accéder aux propriétés de surface et des nuages.

Récemment, le James Webb Space Telescope (JWST) a produit des observations de très haute qualité spectrale. Ces images et spectres permettent de retrouver des informations sur la répartition en latitude de la brume, depuis la basse stratosphère (150 km) jusque dans la troposphère avec une bonne résolution verticale (~ 10 km). Les inversions réalisées nous permettent de reconstruire une carte de la couche de brume à la date de l'observation (5 nov. 2022) et ainsi mettre en évidence les distributions de brumes en lien avec la circulation.

L'analyse d'une partie du corpus de données de VIMS/Cassini avec le même modèle nous permet également de voir, cependant avec une résolution verticale moindre, comment ces brumes évoluent au cours de la saison. Enfin le PCM Titan de l'IPSL, maintenant couplé avec la brume et les nuages, est capable de prédire l'évolution de ces couches dans le cadre du cycle saisonnier. L'interprétation de ces nouveaux résultats du JWST avec les analyses de VIMS et le PCM permet d'interpréter nos résultats à l'aune du cycle saisonnier. On peut alors comprendre comment le cycle de la brume photochimique et de la brume de condensats évoluent au cours du temps sous l'effet de la circulation et ainsi saisir le sens de nos résultats.

Au cours de la durée de vie du JWST, nous espérons pouvoir compléter le sondage saisonnier des propriétés atmosphériques sur la période à venir allant de l'équinoxe d'automne du nord au solstice d'hiver. Il s'agit d'une période peu observée mais qui correspond à un retournement complet de la circulation atmosphérique. Des changements importants devraient être observés durant cette période. Avec l'avènement prochain des très grands télescopes (EELT, TMT, ...) à forte sensibilité et résolution spectrale, ce travail montre qu'un gain en résolution spectrale se traduit - jusqu'à un certain point - en un gain en résolution verticale.

Enfin, la caractérisation complète des cycles de la brume et des nuages, avec les modèles et

*Intervenant

contraintes par les observations les plus précises possibles, est un objectif majeur pour préparer les futures missions vers Titan ; Dragonfly mais aussi celles qui seraient décidées dans un futur plus ou moins lointain.

Study of Titan’s thermal structure and seasonal variations with the Titan PCM

Lucie Rosset ^{*† 1}, Bruno De Batz De Trenquelléon ^{‡ 2,3}, Sébastien Lebonnois ^{§ 3}, Jan Vatant D’ollone ³, Pascal Rannou ^{¶ 2}

¹ Laboratoire Atmosphères, Observations Spatiales (LATMOS) – CNRS, Sobonne Université, Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines (UVSQ) – France

² Groupe de spectrométrie moléculaire et atmosphérique (U. Reims) – Université de Reims - Champagne Ardenne – France

³ LMD – Laboratoire de Météorologie Dynamique – IPSL, École Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris, ENS, PSL Research University, Sorbonne – France

Titan, the largest of Saturn’s moons, possesses a complex atmosphere controlled by deeply interconnected processes. Space exploration missions, like the Cassini-Huygens mission, highlighted the presence of strong seasonal effects, resulting in various phenomena whose underlying mechanisms remains poorly understood (1, 2). Due to the strong coupling of the various processes, the development of a complete climate model is therefore essential to better understand these phenomena. The Titan Planetary Climate Model (Titan PCM), formerly known as the IPSL Titan GCM (3), has thus been improved, and now includes an updated radiative transfer and a new microphysical model for haze and clouds.

The radiative transfer scheme now relies on a flexible k-correlated method. The photochemical solver was extended and the composition is now computed above the top of the Titan PCM (roughly 500km) up to 1300km (4). Updated spectroscopic data on gases were also included. Finally, a new microphysical model in moments for the haze and clouds was developed. The nucleation, condensation and precipitation of the clouds are now modeled (5). This microphysical model and the radiative transfer are now coupled, resulting in a full radiative coupling of both microphysics and chemistry within the Titan PCM.

Taking into account the formation of tropospheric and polar clouds allows to represent the corresponding depletion of the troposphere in aerosols. In the stratosphere, the haze distribution is lead solely by the dynamic. This results in an improved thermal structure in the troposphere and low stratosphere, despite biases above 10Pa due to the vertical limitations of the model.

The simulations obtained from this new version allow to discuss the impact of coupling on the thermal structure. Particular interest is paid to the equinoctial reversal of the circulation at high latitudes and the radiative destabilisation in the low stratosphere. Observed at the end of the winter through Cassini radio-occultations (2), the model allows to trace its evolution through fall, and results indicates a dynamic interplay between haze and gases that influences the thermal

*Intervenant

†Auteur correspondant: lucie.rosset@latmos.ipsl.fr

‡Auteur correspondant: bruno.de-batz-de-trenquelléon@univ-reims.fr

§Auteur correspondant: sillmd@lmd.jussieu.fr

¶Auteur correspondant: pascal.rannou@univ-reims.fr

structure (6).

References :

- (1) S. Vinatier, B. Bézard, S. Lebonnois, N. A. Teanby, R. K. Achterberg, N. Gorius, A. Mamoutkine, E. Guandique, A. Jolly, D. E. Jennings, and F. M. Flasar. *Icarus*, 250: 95–115, Apr. 2015.
- (2) P. J. Schinder, F. M. Flasar, E. A. Marouf, R. G. French, C. A. McGhee, A. J. Kliore, N. J. Rappaport, E. Barbinis, D. Fleischman, and A. Anabtawi. *Icarus*, 221(2):1020–1031, Nov. 2012.
- (3) S. Lebonnois, J. Burgalat, P. Rannou, and B. Charnay. *Icarus*, 218(1): 707–722, Mar. 2012.
- (4) J. Vatant d'Ollone. Thèse de doctorat, Sorbonne université, Jan. 2020.
- (5) B. de Batz de Trenquelléon, P. Rannou, S. Lebonnois, J. Vatant d'Ollone, and J. Burgalat. (in prep.)
- (6) B. de Batz de Trenquelléon, J. Vatant d'Ollone, L. Rosset, S. Lebonnois, P. Rannou, J. Burgalat, and S. Vinatier. (in prep)

12C/13C and 16O/18O isotopic ratios in Titan's stratospheric CO2

Sandrine Vinatier *¹, Bruno Bézard , Christophe Mathé

¹ LESIA, Observatoire de Paris, Université PSL, Sorbonne Université, Université Paris Cité, CNRS, 5 place Jules Janssen, 92195 Meudon, France – LESIA, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, Univ. Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, 5 place Jules Janssen, 92195 Meudon, France. – France

Three oxygen-bearing molecules have been detected in Titan's atmosphere. Carbon monoxide (CO) is the most abundant one with a volume mixing ratio (VMR) of ~ 50 ppm (e.g. Serigano et al. 2016). Because of its very long chemical lifetime (several millions years) and as it does not condense in Titan's atmosphere, it is well homogenized by atmospheric dynamics. The second most abundant oxygen-bearing molecule is carbon dioxide (CO₂) with a VMR of ~ 15 ppb. It shows a local minimum near 0.1 mbar (~ 250 km altitude) at almost all latitudes (Mathé et al. 2020). Such vertical VMR profile is currently not reproduced by photochemical models. The less abundant oxygen molecule detected in Titan's middle atmosphere is H₂O (Cottini et al. 2012) with a VMR smaller than 0.5 ppb at 230 km with no evidence of latitudinal variations. There is currently no consensus regarding the source of oxygen compounds in Titan's atmosphere. The most recent and complete photochemical models, which couple oxygen, nitrogen and hydrocarbon ion and neutral chemistry, incorporate different external sources. An external flux of only OH can lead to the formation of all three oxygenated molecules in the model of Vuitton et al. (2019), while Dobrijevic et al. (2014) explored a possible internal (outgassing of primordial CO from surface) or external sources of O (from Enceladus plumes) and OH/H₂O (from micrometeorites). Both type of models roughly reproduce the observed VMR of CO, CO₂ and H₂O. As studied by Loison et al. (2017), one way to constrain the source of oxygen in Titan's atmosphere is to model measurements of isotopic ratios in oxygenated molecules. Our objectives here are to determine the most accurate 12C/13C and 16O/18O isotopic ratios in CO₂ using the entire CIRS dataset acquired between 2004 and 2017 and to investigate potential latitudinal and seasonal variations, which could be linked to potential fractionation processes. We have analyzed 41 limb observations acquired between 2004 and 2017 at all latitudes. Although our work is still in progress, we derive $\text{CO}_2/^{13}\text{CO}_2 = 53 \pm 3$ and $\text{CO}_2/^{16}\text{O}^{18}\text{O} = 107 \pm 7$ combining all the 41 datasets. The inferred isotopic ratios are smaller in CO₂ than in CO and other carbon-bearing species, suggesting that some fractionation process occurs. We will also discuss the search for latitudinal and seasonal variations.

References :

- Cottini et al. 2012. *Icarus* 220, 855.
- Dobrijevic et al. 2014. *Icarus* 228, 324.
- Loison et al. 2017. *Icarus* 291, 17.
- Serigano et al. 2016. *ApJ* 821, L8.

*Intervenant

- Mathé et al. 2020. *Icarus* 344, 113547.
- Vuitton et al. 2019. *Icarus* 324, 120.

Microphysique des nuages de Titan : contraintes sur leur structure, leur formation et leur transport.

Bruno De Batz De Trenquelléon * ^{1,2}, Pascal Rannou ¹, Sébastien
Lebonnois ²

¹ Groupe de spectrométrie moléculaire et atmosphérique (U. Reims) – Université de Reims -
Champagne Ardenne – France

² LMD – IPSL, Sorbonne Université – France

Sur Titan, tout comme sur Terre, une grande variété de nuages se forme à partir de différents processus et conditions. Contrairement à notre planète, les nuages sur Titan émergent de divers composés volatils. Les observations ont montré plusieurs types de nuages, comme des nuages convectifs de méthane, des nuages stratiformes d'éthane, ou des nuages de haute altitude contenant des composés tels que HCN et HC3N. En outre, un vaste nuage de glace de HCN en haute altitude a été découvert en mai 2012, formé dans le vortex polaire situé au pôle Sud. De manière générale, les nuages convectifs de méthane sont repérés au pôle estival et aux latitudes moyennes, tandis que les autres types de nuages sont observés au pôle hivernal. Malgré les nombreuses observations faites par Cassini et Huygens entre 2004 et 2017, nous avons encore une compréhension limitée des couplages entre les différents cycles qui se déroulent sur Titan (brume, nuages, gaz, etc.).

Le Modèle de Climat Planétaire de Titan (Titan PCM), développé d'abord à l'Institut Pierre-Simon Laplace, est l'outil idéal pour comprendre le fonctionnement de ces cycles et la formation des nuages sur Titan. La transition du modèle en trois dimensions a considérablement amélioré notre connaissance des mécanismes de l'atmosphère moyenne de Titan. Les processus microphysiques associés à la brume ont été mis en œuvre dans le Titan PCM il y a longtemps. Nous y avons désormais adapté et implanté un modèle microphysique pour simuler les processus liés aux nuages de CH₄, C₂H₂, C₂H₆ et HCN, et prévoyons en outre d'ajouter des aspects convectifs. Il s'agit de phénomènes qui n'ont pas encore été simulés dans les modèles de climat 3D de Titan, en particulier la nucléation et la condensation des nuages de méthane, responsables d'une grande partie de la couverture nuageuse de Titan.

Dans cette présentation, nous proposons d'utiliser un modèle microphysique de nuage développé en moment, intégré dans le Titan PCM, afin d'étudier la formation et l'évolution des nuages d'hydrocarbures tout au long de l'année titaniennne. Nous analyserons la structure thermique du modèle, permettant la formation du nuage de

*Intervenant

HCN observé vers 300 kilomètres. Une attention particulière sera portée au cycle du méthane, incluant ses sources, ses puits et les processus associés. Nous aborderons également les propriétés microphysiques des nuages ainsi que les contraintes sur les paramètres influençant leur formation. Une comparaison des résultats du modèle avec les observations existantes sera ensuite réalisée.

Ce projet s'inscrit dans la lignée des recherches précédentes visant à apporter des réponses aux questions persistantes et à approfondir notre compréhension de l'atmosphère de Titan. Le modèle permettra également d'interpréter les futures observations du JWST, ainsi que de préparer la future mission Dragonfly, en caractérisant au mieux le climat attendu dans sa région d'atterrissage.

Observability of atmospheric spatial variability by the VeSUV/VenSpec-U instrument onboard ESA's EnVision mission

Lucile Conan ^{*† 1}, Emmanuel Marcq ¹, Benjamin Lustrement ¹, Maxence Lefevre ¹, Nicolas Rouanet ¹, Sandrine Bertran ², Ann Carine Vandaele ³, Jörn Helbert ⁴, Giulia Alemanno ⁴

¹ Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales – LATMOS/IPSL, Sorbonne université, UVSQ Université Paris-Saclay, CNRS – France

² Hensoldt Space Consulting – Hensoldt Space Consulting – France

³ Royal Belgian Institute for Space Aeronomy – Belgique

⁴ DLR-Institute of Planetary Research – Allemagne

UV investigations of Venus have revealed interesting features regarding the chemical composition and the complex dynamical processes taking place in the atmosphere. The abundance and variability of sulphured gases like SO₂ and SO, as well as the unidentified "UV absorber" have been monitored, and patterns linked to the dynamical activity such as convection cells and atmospheric waves have been observed at both planetary and smaller spatial scales. These topics are the main science interests of the UV spectrometer VenSpec-U, onboard the future ESA mission EnVision, that will focus on the upper atmosphere and perform measurements of the backscattered sunlight on the dayside of Venus. It will operate in the 190-380 nm range, including a second channel with a higher spectral resolution between 205 and 235 nm, at spatial samplings ranging from 3 to 24 km with a pushbroom observation mode. The imaging capabilities of the instrument at small spatial scale are then evaluated in order to estimate the observability of the spatial variability of the key parameters aiming to be measured. To that end, maps of these parameters are derived from a mesoscale model of Venus' atmosphere (Lefèvre et al., 2019), and synthetic radiance factor spectra are generated with a radiative transfer model (RTM). Instrumental effects inducing degradations of the spectra and maps are then simulated, and the latter are spatially binned to match the smallest targeted spatial sampling for VenSpec-U. The degraded spectra are finally processed with the inverse RTM to retrieve the associated atmospheric parameters, from which the maps can be recomposed and compared to the unperturbed simulations.

*Intervenant

†Auteur correspondant: lucile.conan@latmos.ipsl.fr

The Radio-Science experiment onboard EnVision

Caroline Dumoulin * ¹, Pascal Rosenblatt ¹, Silvia Tellmann ²

¹ Laboratoire de Planétologie et Géosciences [LPG UMR 6112] – Nantes université - UFR des Sciences et des Techniques, Univ Angers, Le Mans Université, CNRS, CNRS : UMR6112 – France

² Rhenish Institute for Environmental Research – Allemagne

EnVision's Radio Science experiment comprises two sub-experiments (the Gravity experiment and the Radio occultation experiment), both based on the Telemetry, Tracking and Command (TT&C) system of the spacecraft, but with different scientific objectives and operation modes. The internal structure of Venus is still largely unknown (size and state of the core, mantle viscosity, average thicknesses of the lithosphere and crust, and their lateral variations). These parameters are essential for determining the composition of the mantle, the thermal evolution and the deep interior of the planet. In the absence of seismic data, and Venus having no internal magnetic field, the gravity field is the only tool for determining the radial structure of a planet. Thanks to its 6-cycle mission, EnVision will improve Magellan's gravity field by providing better global resolution (

*Intervenant

3D modelling of the Venusian atmosphere: new results from the Venus PCM and mesoscale model

Maxence Lefevre ^{*† 1}, Sebastien Lebonnois ², Dexin Lai ³, Han Peng ²,
Martinez Antoine ⁴

¹ LATMOS/IPSL – Sobonne Université, Université de Versailles-Saint Quentin en Yvelines, CNRS – France

² LMD – Sobonne Université, Ecole Normale Supérieure de Paris - ENS Paris, Université de recherche Paris Sciences Lettres (PSL), Ecole Polytechnique Université Paris Saclay – France

³ CAS Center for Excellence in Comparative Planetology, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui, China – Chine

⁴ Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC), Glorieta de la Astronomía s/n, Granada, España – Espagne

For twenty years, a Planetary Climate Model (PCM) has been developed for the Venus atmosphere at "Institut Pierre-Simon Laplace" (IPSL). In collaboration between LMD (Paris), IAA (Granada) and LATMOS (Paris), from the surface up to 250 km altitude. Some of the more recent development of the model will be presented:

- Venus PCM has been implemented with an ionospheric model including photoionization (13 for CO₂, CO, O, NO, N₂, N, H and O₂) and ion chemistry (64 reactions for CO₂⁺, CO⁺, O⁺, O₂⁺, N₂⁺, N⁺, H₂O⁺, H₃O⁺, HCO⁺, NO⁺, H⁺, C⁺, OH⁺, HCO₂⁺ and e⁻), and a vertical ambipolar diffusion model. The ambipolar diffusion for ions is necessary above 180 km altitude. With the addition of this process, the electron number density predicted by Venus PCM is in good agreement with Pioneer Venus observations. Below 180 km, the photochemistry processes dominate over the ambipolar diffusion and its effects are negligible as expected.

- Until now, the Venus PCM (Planetary Climate Model) has been using precomputed tables for the distribution of the solar heating rates in the atmosphere of Venus. A new scheme is now implemented to compute online the radiative transfer of the solar flux, which allows more flexibility to study sensitivity to opacity sources. We have investigated the sensitivity of the temperature and circulation of the Venusian cloud region to the distribution of the UV absorber.

- High-resolution runs of the Venus PCM (1.25° in longitude and latitude) successfully simulated Venus atmospheric superrotation. The results show a clear spectrum and structure of atmospheric waves, primarily with periods of 5.65 days and 8.5 days. The simulation successfully reproduces long-term quasi-periodic oscillation of the zonal wind and primary planetary-scale wave seen in observations. These oscillations are obtained with a period of about 163-222 days close to the observation.

Even at high spatial resolution, global climate models cannot resolve turbulent processes. A mesoscale model was developed to study features such as mountain waves. To study the near-

*Intervenant

†Auteur correspondant: maxence.lefevre@latmos.ipsl.fr

surface dynamics, new simulations were considered for this study, one centered on seven locations of VENERA landing sites, where winds were measured, and one centered on the North Pole where the largest mountain is located. The horizontal resolution is respectively 20 and 15 km. The recent results will be presented.

Determination of Venus' rotation state using radio-tracking data from the Venus Express spacecraft

Maëva Lévesque * ¹, Pascal Rosenblatt ¹, Caroline Dumoulin ¹,
Jean-Charles Marty ²

¹ Laboratoire de Planétologie et Géosciences [UMR_C6112] –
– *LeMansUniversit, Universitd' Angers, InstitutNationaldesSciencesdel'Univers, CentreNationaldelaRechercheScie*
UFRdesSciencesetdesTechniques – –France

² Centre National d'Études Spatiales [Toulouse] – Centre National d'Études Spatiales - CNES (Toulouse, France) – France

Although Venus is often considered as the Earth's twin sister, our knowledge of its internal structure, including the size and state of its core are limited. Its rotational state, although measured by several techniques (from orbit or from ground-based radar), is not very well constrained and shows temporal variations that remain unexplained. The Venus Express (VEX) spacecraft was launched by the European Space Agency (ESA) in November 2005 and orbited the planet for nearly 8 years, from mid-2006 to 2014. This mission was dedicated to the study of the atmosphere of the planet, however, the radio-tracking data performed for navigation purposes can also be used to determine the rotational state of the planet. For this, we use the Precise Orbit Determination (POD) method, which consists of performing an iterative least-squares fit of a force model driving the spacecraft's motion to these tracking data. We found a spin period of -243.023 ± 0.001 days, which is consistent and better constrained than the solutions published using tracking data of previous Venusian orbiters (PVO, Magellan) and using radar measurements from the ground. This study shows that navigation tracking data of planetary orbiters can also be used for science investigation.

*Intervenant

Le spectromètre VenSpec-U à bord d'EnVision

Emmanuel Marcq ^{*†} ¹, Benjamin Lustrement , Sandrine Bertran , Lucile Conan , Jeremie Lasue , Sandrine Vinatier , Luisa Lara , Ann Carine Vandaele , Jörn Helbert

¹ Laboratoire Atmosphères, Observations Spatiales – Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, Institut national des sciences de l'Univers, Sorbonne Université, Institut national des sciences de l'Univers – France

L'instrument VenSpec-U est un des instruments de la suite VenSpec à bord de la mission ESA M5 EnVision. Ses principaux objectifs scientifiques sont les suivants : (1) étudier comment les variations des gaz mésosphériques sont liées aux processus de surface (dont le volcanisme), afin d'identifier les causes de la variabilité des gaz soufrés mésosphériques (SO, SO₂) ; (2) étudier comment la variabilité des nuages et des particules est liée aux processus de surface (dont le volcanisme), afin de détecter les panaches de cendres volcaniques ou les perturbations des nuages causés par le volcanisme, et de comprendre tout lien entre les nuages d'acide sulfurique de Vénus et le volcanisme.

VenSpec-U est donc dédié à la cartographie des gaz soufrés du sommet des nuages (SO, SO₂) ainsi qu'aux contrastes d'albédo UV, via l'analyse spectrale et spatiale de la lumière solaire rétrodiffusée au sommet des nuages de Vénus. Les observations sont réalisées selon une stratégie d'observation en " pushbroom ", dans une géométrie nadir ou quasi-nadir (angle d'émission < 20°) grâce à un spectromètre imageur UV fonctionnant dans la plage spectrale de 190 à 380 nm. Les résolutions spectrales seront inférieures à 0,3 nm dans la plage de 205 à 235 nm (rapport signal sur bruit typique de 100 ou plus à 220 nm), et de l'ordre de 2 à 5 nm dans la plage de 190 à 380 nm (rapport signal sur bruit typique de 200 ou plus à 220 nm). L'échantillonnage spatial variera de 3 km à 24 km, en fonction de la résolution spectrale et de l'altitude de l'orbiteur. L'axe étroit de la fente contiendra les informations spectrales, tandis que l'axe long contiendra les informations spatiales le long du champ de vision transverse de 20°. La direction spatiale restante est fournie par le défilement orbital d'EnVision.

L'instrument VenSpec-U est donc basé sur une architecture à double canal, haute résolution spectrale (HR) et basse résolution spectrale (LR). Chaque canal se compose d'une baffle d'entrée, d'un objectif et d'un spectromètre principalement composé d'une fente, d'un filtre passe-bas et d'un réseau holographique. Chaque image de fente est formée sur un détecteur CMOS rétro-éclairé et partagé entre les deux canaux. Le détecteur est contrôlé de manière à ce que le temps d'intégration et le schéma de binning soient ajustés indépendamment (et simultanément) pour chaque canal, ce qui confère une grande flexibilité pour l'optimisation de chaque acquisition. L'étalonnage sera effectué par des observations régulières du Soleil, à travers des *pinholes* ou sur un diffuseur uniforme.

*Intervenant

†Auteur correspondant: emmanuel.marcq@latmos.ipsl.fr

Références :

* E. Marcq et al. (2021) "Instrumental requirements for the study of Venus' cloud top using the UV imaging spectrometer VeSUV", doi:10.1016/j.asr.2021.03.012

Viscosity of Venus' mantle as inferred from its rotational state

Yann Musseau ^{* 1}, Gabriel Tobie ¹, Caroline Dumoulin ¹, Cedric Gillmann ², Alexandre Revol ³, Emeline Bolmont ³

¹ Laboratoire de Planétologie et Géosciences [LPG UMR 6112] – Nantes université - UFR des Sciences et des Techniques, Univ Angers, Le Mans Université, CNRS, CNRS : UMR6112 – France

² Institute of Geophysics, Geophysical Fluid Dynamics [ETH Zürich] – Suisse

³ Département d'Astronomie, Université de Genève – Suisse

Venus' rotation is the slowest of all planetary objects in the solar system and the only one in the retrograde direction. It is commonly admitted that such a rotation state is the result of the balance between the torques created by the gravitational and atmospheric thermal tides¹. The internal viscous friction associated with gravitational tides drive the planet into synchronization (deceleration) while the bulge due to atmospheric thermal tides tend to accelerate the planet out of this synchronization¹. Other torque components (related to the two first one) also affect the rotation². This work first provide an estimate of the viscosity of Venus' mantle explaining the current balance with thermal atmospheric forcing. Second, this study quantify the impact of the internal structure and its past evolution on the gravitational tides and thus on the rotation history of Venus. Using atmospheric pressure simulations from the Venus climate database, we first estimated the atmospheric thermal torque and showed that topography and interior response to atmospheric loading, usually ignored in previous studies, have a strong influence on the amplitude of thermal atmospheric torque. Computing the viscoelastic response of the interior to gravitational tides and atmospheric loading³, we showed that the current viscosity of Venus' mantle must range between 2.3×10^2 Pa.s and 2.4×10^{21} Pa.s to explain the current rotation rate as an equilibrium between torques. We then evaluated the possible past evolution of the viscosity profile of the mantle considering different simple thermal evolution scenarios. We showed that in absence of additional dissipation processes, viscous friction in the mantle cannot slowdown the rotation to its current state for an initial period shorter than 2-3 days, even for an initially very hot mantle. Beyond Venus, these results has implications for Earth-size exoplanets indicating that their current rotation state could provide key insights on their atmosphere-interior coupling.

¹Correia, A. C. M. and J. Laskar (2001), *Nature*.

²Correia, A. C. M. (2003), *Journal of Geophysical Research*.

³Dumoulin, C., G. Tobie, O. Verhoeven, P. Rosenblatt and N. Rambaux (2017), *Journal of Geophysical Research*.

Lebonnois, S., F. Hourdin, V. Eymet, A. Cresspin, R. Fournier and F. Forget (2010), *Journal of Geophysical Research*.

Lebonnois, S., N. Sugimoto and G. Gilli (2016), *Icarus*.

Leconte, J., H. Wu, K. Menou and N. Murray (2015), *Science*.

*Intervenant

Martinez, A., S. Lebonnois, E. Millour, T. Pierron, E. Moisan, G. Gilli and F. Lefèvre (2023), Icarus.

The Venus Climate Database, VCD version 2.3

Ehouarn Millour ^{*} ¹, Sebastien Lebonnois ², Martinez Antoine ³, Thomas Pierron ⁴, Alexandre Boissinot ⁵, Francois Forget ^{*}

, Aymeric Spiga ^{*}

⁶, Jean-Yves Chaufray ⁷, Franck Montmessin ⁸, Franck Lefèvre, Fabrice Cipriani ⁹

¹ Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD) – IPSL CNRS Sorbonne Université – France

² LMD – Sorbonne Université, Ecole Normale Supérieure de Paris - ENS Paris, Université de recherche Paris Sciences Lettres (PSL), Ecole Polytechnique Université Paris Saclay – France

³ Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC), Glorieta de la Astronomía s/n, Granada, España – Espagne

⁴ Laboratoire de Météorologie Dynamique (UMR 8539) – CNRS : UMR8539 – France

⁵ Laboratoire de Météorologie Dynamique – CNRS-UPMC-Ecole Polytechnique – France

⁶ LMD/IPSL – Sorbonne Universités, UPMC, CNRS – France

⁷ LATMOS – CNRS : UMR8190, Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines (UVSQ) – France

⁸ PLANETO - LATMOS – Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales – France

⁹ European Space Agency, ESTEC/TEC-EPS (ESTEC) – Pays-Bas

Based on the state-of-the-art Venus Planetary Climate Model (PCM, formerly known as the Venus IPSL GCM) developed by our team, we have generated a Venus Climate Database (VCD) (<http://www-venus.lmd.jussieu.fr/>). This tool was developed with funding from ESA in the context of the preparation of the upcoming EnVision mission. The latest version of the VCD, VCD2.3, was released in fall 2023.

The VCD provides mean values and statistics of the main meteorological variables (atmospheric temperature, density, pressure and winds) as well as atmospheric composition and related physical fields. It extends from the surface up to and including the thermosphere (~ 250 km). The database contains high resolution temporal outputs (using 24 hourly bins) enabling a good representation of the diurnal evolution of quantities over a climatological Venusian day.

As the goal of the VCD is to provide information about the state of the Venusian atmosphere, various realistic settings have been used to run a series of baseline GCM simulations, namely:

- Simulations using various Extreme UltraViolet (EUV) input from the Sun, as this forcing influences significantly the thermosphere (~ 120 km and above).
- Some supplementary simulations with extreme values of UV cloud albedo, to bracket the state of the atmosphere below the thermosphere.

In addition to the aforementioned VCD scenarios, the following features are available:

- A "high resolution" mode based on a high resolution topography map (at 23 pixels/degree).

*Intervenant

- Access to the Venusian intra-hour variability (RMS) of main meteorological variables, as well as the Venusian day-to-day variability thereof.
- The possibility to add perturbations to the climatological fields in order to generate realistic weather conditions.

The VCD is distributed as (i) a main Fortran subroutine that users can interface and directly call from their own programs, interfaces to call this gateway routine using other programming languages (e.g. C, Python, IDL, Matlab, ...) are also provided; (ii) a web interface, for quick looks (<http://www-venus.lmd.jussieu.fr>).

Polar motion of Venus and EnVision measurements

Pierre-Louis Phan * ¹, Nicolas Rambaux ¹

¹ Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Ephémérides – Observatoire de Paris, PSL, Sorbonne Université, CNRS – France

Venus is comparable to Earth in mass and size, but is hardly considered a habitable world due to its present-day surface temperatures. This makes Venus a valuable case study for understanding planetary evolution in terms of habitability, and has prompted the selection of three exploration missions towards it in the next decade.

Notably, one of EnVision mission objectives is a geophysical investigation of Venus (Widemann 2023). Examining the rotational dynamics of an object can offer clues about the nature and properties of its interior, notably the size of its core.

The motion of the spin axis of a planet can be described with respect to the fixed celestial sphere (precession and nutation) or with respect to the planetary surface itself (polar motion), both motions bringing complementary clues about the planet’s interior. The precession motion of the spin axis of Venus has been recently measured for the very first time, albeit with an uncertainty too large to help constrain interior models (Margot et al. 2021), while its polar motion has yet to be measured.

Here we develop a model of polar motion for Venus with a triaxial viscoelastic mantle, a spherical liquid core and an atmospheric layer, subjected to the solar torque. We study the influence of geophysical parameters such as the moment of inertia and the size of the core, in anticipation of its future exploration by the EnVision mission.

References

Widemann, T., Smrekar, S.E., Garvin, J.B. et al. Venus Evolution Through Time: Key Science Questions, Selected Mission Concepts and Future Investigations. *Space Sci Rev* 219, 56 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11214-023-00992-w>

Margot, J.L., Campbell, D.B., Giorgini, J.D. et al. Spin state and moment of inertia of Venus. *Nat Astron* 5, 676–683 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41550-021-01339-7>

*Intervenant

VRExplorer an immersive and collaborative tool to multiply field trip experiences

François Civet ^{*† 1}, Lionel Clarke ¹, David Vandergucht ¹, Guillaume Bertrand ¹, Kevin Costard ¹, Charlotte Clochez ¹

¹ VR2Planets – VR2Planets – France

VRExplorer

This software is an immersive and collaborative tool allowing visualization and analysis of planetary terrains. This tool has been developed for education of the new generation of geoscientists to improve the comprehension of planetary terrains. After several months of deployment, VRExplorer already shows a huge potential both for students and researchers. The software is based on a cloud platform on which users can upload their dataset, using standard formats used by the geoscience community: digital terrain models, meshes, and point clouds. It creates the virtual scenes automatically and share the tiles to remote users in real time up to the native resolution of the dataset. Connecting to the application, users can see and talk to each other, they can navigate over the terrains stored on the server using both virtual reality headsets and classical computers.

A cloud-based storage

The web-platform allows users to upload GeoTIFFs satellite images to create regional context of areas of interest. It reads the metadata of images providing an absolute geographic reference for each virtual scene based on the projection information of inputs. Virtual terrains are then processed using both topographical (DTM) and texture (orthoimages).

Users can also upload meshes in 3DTiles format (Standard from Open Geospatial consortium). This specific file format enables to store and share massive meshes preserving the initial resolution of the data and the geographic reference. The result is a fusion of massive datasets shared to multiple users.

A tool for teaching geosciences

VRExplorer is already used in several universities and aims at becoming a reference for virtual pedagogy on unreachable terrains.

For teachers, this tool is used to:

- Easily share and explore geodata-rich scenes of various kind,

*Intervenant

†Auteur correspondant: fcivet@vr2planets.com

- Create courses and assessments into the virtual scene,
- Gather records of user experiences, measurements created by users, and answers to course sessions for post course analysis.

For students, it's a ludo-educative tool providing emotional experiences which are well-known to be a multiplier in the process of understanding and memorization.

IPSL climactions and the bottom-up ecological transformation of a climate research institute (2016-2024)

Aurélien Falco ^{*†} ¹, Ipsl Climactions ¹

¹ Laboratoire de Météorologie Dynamique (UMR 8539) – CNRS – France

For several decades now, research communities working on the climate, its changes, including current global warming, and its consequences have been recommending drastic reductions in human-made greenhouse gas emissions and, more generally, in the ecological footprint of human activities. This implies the implementation over the next 10 to 20 years of profound and rapid systemic transformations. The latest IPCC reports show that such transformations are only possible if they involve all parts/sectors of society. Given the existence of a range of ecological constraints and the foreseeable limits to scientific and technical advances, the transformations to be implemented must also include a strong component of sufficiency ("avoidance").

Since 2016, IPSL scientists and support staff have been working together along these lines to transform the institute's professional practices. This engagement is generally seen as : (i) a necessity: to initiate a transition in its research practices that will bring its professional behavior in line with the message of climate urgency that it has been diffusing for over 30 years; (ii) an opportunity: to accelerate the transition at a societal level by opening up new channels of exchange with society, encouraging collective action by example, and reinforcing the credibility of its warning message; (iii) a safeguard: collective bottom-up thinking at laboratory level to ensure that this transition takes place with maximum respect for our research practices and our well-being at work, and is not imposed by potentially inappropriate top-down measures.

Achievements include (i) the development of methodologies for calculating the carbon footprint generated by staff activities and professional practices, (ii) concrete contributions to the reduction of the environmental footprint of professional travels, digital and high performance computing activities, purchases and finally observation of the earth. We will present here our approach, methodologies, achievements, and reflections at this stage, with the hope to stimulate exchange with other ongoing or emerging initiatives in other parts of the world.

*Intervenant

†Auteur correspondant: aurelien.falco@lmd.ipsl.fr

Repenser la recherche en astrophysique à l'ère de la transition écologique : démarche et premiers résultats d'une enquête qualitative menée par le groupe de travail " coeur de métier de l'astrophysique " du collectif Labos1point5

Antoine Hardy* ¹, Mathieu Bouffard † ², Matteo Barsuglia ³, Françoise Billebaud ⁴, Nicolas Champollion ⁵, Patrick Hennebelle ⁶, Héloïse Méheut ⁷, Marie-Laure Parmentier ⁸, Patrick Petitjean ⁹

¹ Centre Émile Durkheim – Sciences Po Bordeaux - Institut d'études politiques de Bordeaux, Université de Bordeaux, Centre National de la Recherche Scientifique – France

² Laboratoire de Planétologie et Géosciences

[UMR_C6112] – –CNRS, NantesUniversité, CNRS : UMR6112 – –France

³ Laboratoire Astroparticule et Cosmologie – Université Paris Cité, Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules du CNRS – France

⁴ Université de Bordeaux – Sciences and Technology College – France

⁵ Institut des Géosciences de l'Environnement – Institut de Recherche pour le Développement, Institut National des Sciences de l'Univers, Centre National de la Recherche Scientifique, Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement, Université Grenoble Alpes, Institut polytechnique de Grenoble - Grenoble Institute of Technology, Institut Polytechnique de Grenoble - Grenoble Institute of Technology – France

⁶ Astrophysique Interprétation Modélisation – Université Paris-Saclay, Sorbonne Universités – France

⁷ Joseph Louis LAGRANGE – Observatoire de la Côte d'Azur, Université Côte d'Azur, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR7293 – France

⁸ Institut de Génomique Fonctionnelle – IGF, Univ. Montpellier, CNRS, INSERM, Montpellier, France – France

⁹ Institut d'Astrophysique de Paris – CNRS – France

Les bouleversements climatiques et environnementaux nécessitent de revoir en profondeur le fonctionnement de l'ensemble des secteurs d'activité, y compris les métiers de la recherche. Au sein des différents groupes de travail du collectif Labos1point5, qui dans une large mesure s'emploient à développer les outils et les conditions pour évaluer et réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) dans l'enseignement supérieur et la recherche (ESR), des questions et discussions concernant les activités de recherche reviennent fréquemment. Il s'agit, dans le contexte de la crise climatique et environnementale, de s'interroger sur l'utilité de ces activités, les émissions qu'elles engendrent et les réductions possibles. Ces questions sont en particulier motivées par les résultats des premiers bilans GES et leur analyse. S'il est sûrement possible de réduire certains

*Auteur correspondant: antoine.hardy@scpobx.fr

†Intervenant

postes, comme par exemple le nombre de déplacements associés aux colloques internationaux, ces derniers ne représentent souvent qu'une fraction assez modeste des émissions des laboratoires. Une réduction très significative, dans la lignée des accords de Paris par exemple, ne pourra sans doute pas se faire sans une réduction des activités de recherche. Se pose alors la question de savoir dans quelle mesure cela est souhaitable. Quel compromis établir entre d'une part le rôle sociétal joué par la recherche dans chaque discipline et, d'autre part, la nécessaire réduction des émissions de GES ?

Dans le cadre de l'équipe réflexion du collectif Labos1point5, trois groupes de travail (GTs) nommés " cœur de métier " se sont formés pour aborder cette question respectivement en astrophysique, biologie et informatique ; trois disciplines qui présentent des problématiques très différentes au regard des questions environnementales et sociales. L'objectif de ces GT est :

- 1) de connaître la vision qu'ont les chercheurs d'une discipline de l'évolution éventuelle des pratiques et des questionnements de cette discipline dans un futur bas-carbone
- 2) de repérer les leviers ou freins à cette projection dans le futur en tenant compte de la vision qu'ont les chercheurs et chercheuses de l'utilité sociale de leur discipline.

Chaque groupe de travail, constitué de chercheurs/chercheuses et d'ingénieurs de la discipline ainsi que de sociologues et de quelques chercheurs extérieurs au domaine, conduit des entretiens semi-dirigés de chercheurs.ses expert.e.s de la discipline. Les questions posées portent, entre autres, sur la familiarité et la sensibilité à la crise environnementale au niveau personnel, sur l'utilité sociale de la discipline, sur les possibles réductions de ses émissions, et sur les conséquences qui pourraient en découler, tant pour les chercheurs que pour la discipline dans son ensemble.

Au cours de l'exposé, je présenterai les interrogations qui ont motivé cette démarche, l'élaboration de la méthode et les premiers résultats obtenus par le GT " cœur de métier astrophysique ". Je reviendrai en particulier sur la perception du rôle social joué par l'astrophysique ainsi que sur les freins principaux à la décarbonation de la discipline qui sont exprimés dans ces entretiens.

L'expérience INGMAR en support aux observations : vers les astéroïdes et au-delà

Cateline Lantz * ¹, Rosario Brunetto ¹, Donia Baklouti ¹, Alice Aléon-Toppani ¹, Elsa Hénault ¹, Obadias Mivumbi ¹, Jérôme Bourçois ², Cyril Bachelet ², Philippe Benoit Lamaitrie ², Ferenc Borondics ³, Zahia Djouadi ¹, Zélia Dionnet ¹, Dominique Ledu

¹ Institut d'astrophysique spatiale – Institut National des Sciences de l'Univers, Université Paris-Saclay, Centre National de la Recherche Scientifique, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR8617 – France

² Laboratoire de Physique des 2 Infinis Irène Joliot-Curie – Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules du CNRS, Université Paris-Saclay, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR9012, Centre National de la Recherche Scientifique – France

³ Synchrotron SOLEIL – Centre National de la Recherche Scientifique, Centre National de la Recherche Scientifique : UR1 – France

L'expérience INGMAR (IrradiationN de Glaces et Météorites Analysées par Réflectance VIS-IR) a été conçue pour permettre l'étude des processus d'altération spatiale (ou " space weathering " en anglais) en couplant une ligne d'irradiation ionique (SIDONIE, IJCLab) à une chambre à vide permettant un suivi spectroscopique in situ. L'utilisation de la ligne SMIS au Synchrotron Soleil nous permet d'étendre la gamme de mesure jusque dans le lointain IR.

Depuis 10 ans nous menons des études sur des objets de type chondrites carbonées afin d'apporter un support aux observations des missions spatiales. Nous présenterons quelques applications de ces mesures, notamment dans le contexte actuel des missions de retour d'échantillons Hayabusa2 et OSIRIS-REx, mais également du futur relevé de la population astéroïdale qui sera fourni par le JWST. Finalement, nous passerons en revue les différentes expériences menées au fil des années sur des analogues variés, y compris des glaces, nous permettant de couvrir de nombreux corps du Système solaire. Brunetto et al. 2014, 2020

Lantz et al. 2015, 2017, in press

*Intervenant

Préparer les opérations spatiales depuis le laboratoire : utilisation du " flight spare " de MicrOmega/ExoMars

Damien Loizeau * ¹, Jean-Pierre Bibring , Cédric Pilorget , Vincent Hamm , Lionel Lourit , Guillaume Lequertier , François Poulet , Lucie Riu , Tania Le Pivert-Jolivet , Celine Lantz , Rosario Brunetto

¹ Institut d'astrophysique spatiale – CNRS, Université Paris Sud, Université Paris Saclay – France

MicrOmega est un microscope hyperspectral proche-IR développé à l'Institut d'Astrophysique Spatiale à Orsay, pour analyser les échantillons prélevés par la foreuse au sein du rover Rosalind Franklin de la mission ExoMars (Bibring et al., 2017). L'instrument permet d'acquérir des données hyperspectrales sur un champ de vue de $5 \times 5 \text{ mm}^2$ (256 \times 256 pixels de $20 \times 20 \mu\text{m}^2$) dans une gamme spectrale 0.99-3.65 μm , ce qui permet la détection et cartographie de minéraux et molécules organiques dans les échantillons. Lors de son développement, 2 modèles ont été intégrés et testés, un Flight Model FM, installé sur le rover et qui ira se poser à la surface de Mars, et un Flight Spare FS, maintenu au laboratoire, dans des conditions de stérilité et de propreté identiques à celles du FM.

Nous avons construit au sein du laboratoire une enceinte permettant d'utiliser facilement ce MicrOmega FS pour tester des procédures d'observation, des échantillons analogues ou encore des conditions d'observation variées, afin de mieux préparer les opérations du MicrOmega FM à la surface de Mars (Loizeau et al., 2020). L'instrument est placé dans une boîte purgée au N₂ pour maintenir une atmosphère propre et sèche. Il est en contact thermique avec une plaque de cuivre que l'on peut refroidir jusqu'à -20°C pendant les opérations, par exemple pour simuler des conditions martiennes. Cette boîte est elle-même située dans une boîte à gant également purgée au N₂ dans laquelle on vient manipuler les échantillons, qui peuvent également être refroidis jusqu'à -20°C. Cette installation permet un contrôle des conditions d'observation et de l'état de l'échantillon, dans des conditions de propreté optimales.

Les conditions sont ainsi réunies pour utiliser MicrOmega FS afin de préparer au mieux les observations de MicrOmega FM sur Mars. Nous pouvons :

- Tester différentes séquences d'observation pour tester leurs durées d'opération et l'énergie consommée, des ressources cruciales pour une mission robotisée sur Mars.
- Tester des conditions d'observations différentes, en termes de température ou d'état de l'échantillon,
- Simuler les étapes d'étalonnage qui auront lieu sur le rover,

*Intervenant

- Tester un grand nombre d'échantillons analogues terrestres afin de se préparer à l'analyse des roches martiennes (e.g., Loizeau et al., 2022),
- Mener des observations conjointes avec d'autres instruments similaires à ceux du rover (notamment au niveau de l'ALD) afin de préparer l'interprétation collaborative des données des différents instruments.

Un autre exemplaire de MicrOmega est également présent au sein du centre de curation des échantillons de Ryugu à l'ISAS/JAXA au Japon. Ce modèle observe tous les grains de Ryugu avant leur sortie de leur enceinte de protection (e.g., Pilorget et al., 2022). Ici aussi, l'utilisation de MicrOmega FS à l'IAS à Orsay nous permet de préparer et compléter des observations faites au Japon.

Références:

Bibring, J.P., Hamm, V., Pilorget, C. and Vago, J.L., 2017. The MicrOmega investigation onboard ExoMars. *Astrobiology*, 17(6-7), pp.621-626.

Loizeau, D., Lequertier, G., Poulet, F., Hamm, V., Pilorget, C., Meslier-Lourit, L., Lantz, C., Werner, S.C., Rull, F. and Bibring, J.P., 2020. Planetary Terrestrial Analogues Library project: 2. building a laboratory facility for MicrOmega characterization. *Planetary and Space Science*, 193, p.105087.

Loizeau, D., Pilorget, C., Poulet, F., Lantz, C., Bibring, J.P., Hamm, V., Royer, C., Dypvik, H., Krzesińska, A.M., Rull, F. and Werner, S.C., 2022. Planetary Terrestrial Analogues Library Project: 3. Characterization of Samples With MicrOmega. *Astrobiology*, 22(3), pp.263-292.

Pilorget, C., Okada, T., Hamm, V., Brunetto, R., Yada, T., Loizeau, D., Riu, L., Usui, T., Moussi-Soffys, A., Hatakeda, K. and Nakato, A., 2022. First compositional analysis of Ryugu samples by the MicrOmega hyperspectral microscope. *Nature Astronomy*, 6(2), pp.221-225.

PyBWE : Une bibliothèque Python Open-Source pour l'application de méthodes de Super-Résolution aux Radars Sondeurs Planétaires

Nicolas Oudart * ¹, Valérie Ciarletti ¹, Alice Le Gall ¹, Emile Brighi ¹

¹ Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales – CNRS, Université de Versailles
Saint-Quentin-en-Yvelines (UVSQ) – France

La résolution en distance est un des principaux paramètres à fixer lors de la conception d'un radar sondeur. Elle est directement liée à la résolution en temps des sondages du radar, elle-même inversement proportionnelle à la largeur de bande de fréquences de l'instrument, et aux propriétés électromagnétiques des matériaux sondés. Les techniques modernes de modulation radar requièrent une méthode d'estimation spectrale afin d'obtenir des sondages en domaine temporel, interprétables par un humain. La " Fast Fourier Transform " (FFT) est le plus souvent choisie pour sa robustesse et sa rapidité. Cependant, la résolution des sondages obtenus est limitée par l'inverse de la bande de fréquences et le fenêtrage. C'est pourquoi des techniques avancées d'estimation spectrale, basées sur des modèles paramétriques des signaux, ont été proposées dans les années 1980 **(5)**. Permettant une meilleure résolution en temps que la FFT, elles sont dites de " super-résolution ".

Les techniques " Bandwidth Extrapolation " (" extrapolation de bande de fréquences " ou BWE) **(2)** ajustent un modèle paramétrique à un spectre radar donné. Ce modèle est ensuite utilisé pour extrapoler le spectre en sens direct et inverse. Ce spectre est pour finir transformé en domaine temporel par FFT. L'amélioration en résolution par rapport à une FFT seule est égale au facteur d'extrapolation. En pratique, ce facteur est limité à environ 3 **(7)**, notamment à cause du bruit et des distorsions présentes dans les spectres radar expérimentaux.

La BWE a été appliquée à de nombreuses reprises à des données de radars sondeurs planétaires durant la dernière décennie. On peut citer les résultats suivants : (1) La première bathymétrie d'une mer de Titan (Cassini **(6)**), (2) L'amélioration de l'analyse stratigraphique des calottes polaires martiennes (Mars Express **(4)** et MRO **(11)**), (3) L'estimation des atténuations du proche sous-sol martien (Mars 2020 **(3)**), (4) La préparation des opérations de forage de la mission ExoMars **(8)**.

Nous avons mis en ligne cette année le premier logiciel open-source de BWE, sous la forme d'une bibliothèque Python nommée " PyBWE " **(9)**. PyBWE est accessible via PyPI, et son code source est disponible sur GitHub. Nous avons divisé la bibliothèque en 3 paquets, correspondant chacun à un type de modèle paramétrique différent :

- PyBWE : La méthode " classique " **(2)**. Elle utilise un modèle AR, déterminé par l'algorithme

*Intervenant

de Burg.

- PyPBWE : La " Polarimetric BWE " est une adaptation aux radars polarimétriques **(12)**. Elle utilise un modèle AR multi-voies, déterminé par une version modifiée de l'algorithme de Burg.

- PySSBWE : La " State-Space BWE " est basée sur un modèle moins stable mais plus réaliste **(10)**. Elle utilise un modèle ARMA, déterminé par représentation d'état.

Notre intention est que cette bibliothèque soit à la fois utile aux planétologues avec des solutions intégrées faciles à prendre en main, et aux experts radar avec des fonctions individuelles pour la modélisation et l'extrapolation. Nous présenterons des exemples d'application de PyBWE sur des données expérimentales du radar WISDOM (ExoMars/ESA) **(1)**.

Références :

(1) Ciarletti et al., 2017, Astrobiology, <https://doi.org/10.1089/ast.2016.1532>

(2) Cuomo, 1992, Lincoln Laboratory report

(3) Eide et al., 2022, Geophysical Research Letters, <https://doi.org/10.1029/2022gl101429>

(4) Gambacorta et al., 2022, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, <https://doi.org/10.1109/tgrs.2022.3141429>

(5) Kay & Marple, 1981, Proceedings of the IEEE <https://doi.org/10.1109/proc.1981.12184>

(6) Mastrogiuseppe et al., 2014, The bathymetry of a titan sea, Geophysical Research Letters, <https://doi.org/10.1002/2013gl058618>

(7) Moore et al., 1997, Lincoln Laboratory Journal

(8) Oudart et al., 2021, Planetary & Space Science, <https://doi.org/10.1016/j.pss.2021.105173>

(9) Oudart et al., 2024 (in review), Journal of Open Source Software

(10) Piou, 1999, Lincoln Laboratory report

(11) Raguso et al., 2023, Icarus, <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2023.115803>

(12) Suwa & Iwamoto, 2007, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, <https://doi.org/10.1109/tgrs.2007.908888>

Chemical analyses provided by CosmOrbitrap-based instruments for future space missions to ocean worlds

Laura Selliez ^{*† 1}, Rachel De Jesus ¹, Julie Lavoise ¹, Laurent Thirkell ¹,
Ricardo Arevalo ², Adrian Southard ³, Jean-Pierre Lebreton ¹, Bertrand
Gaubicher ¹, Fabrice Colin ¹, Christelle Briois ¹

¹ Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement et de l'Espace – Centre National de la
Recherche Scientifique - CNRS, Université d'Orléans, CNES – France

² University of Maryland, College Park, MD, USA, – États-Unis

³ UMD/CRESST II, College Park, MD, USA – États-Unis

Ocean worlds of the Solar System have all the prerequisite ingredients for the emergence of life as we know it. Among them, Titan and Enceladus icy moons house subsurface liquid water oceans, possess various sources of energy and identifications of complex organics molecules have been suggested thanks to the Cassini-Huygens mass spectrometers **(1-3)**. Particularly targeted by the space agencies, several mission concepts (and instruments) are currently in development or in preparation. For the future astrobiology space missions, payloads should include High Resolution Mass Spectrometers (HRMS) in order to enhance unequivocal identifications of most biosignatures and prebiotic molecules. The unprecedented analytical performances of the CosmOrbitrap-based laser HRMS instrument **(4)** have been demonstrated in the lab by using a large range of samples: pure amino acids, pure heavy organic compounds, organics mixed with water or salts, short peptide biosignatures similar to those observed in cold-living extremophiles on Earth and even complex organic matter analog to the one found in the Titan atmosphere **(5-9)**. Based on this technology, the CORALS (Characterization of Ocean Residues and Life Signatures) spaceflight prototype instrument recently achieved Technical Readiness Level (TRL) of 5+ **(10)**. This study reports the latest results obtained with the laser CosmOrbitrap-based test bench used at LPC2E (Orléans, France) on analogs or representative samples of Titan and Enceladus' compounds. Among them, analogs of Titan aerosols (the so-called tholins) are produced with the PAMPRE laboratory experiment at LATMOS **(11)** and natural analogs coming from the Mono lake (California, USA) are representative of the Enceladus subsurface salty ocean **(12)**. The analyses of these hypersaline lake samples are involved in a comparative study with another technique coupling capillary electrophoresis with a mass spectrometer **(13)**. Arevalo and collaborators **(14)** have also looked for organics at relevant concentrations in salt water mimicking Enceladus samples providing a demonstration of CORALS to collect collision cross section measurements. For going further, a presentation of a complex CosmOrbitrap-based instrument will be provided. The AROMA (Advanced Resolution Organic Molecule Analyzer) aims to couple the CosmOrbitrap to a Linear Ion Trap (developed for the Dragonfly mission) capable of tandem mass spectrometry (MS/MS). This coupling will enable a deeper chemical analysis of

*Intervenant

†Auteur correspondant: laura.selliez@cnr-orleans.fr

the extraterrestrial samples of primary interest in astrobiology **(15)** through identification of the fragments formed during collisional induced dissociation. The breadboard of this instrument is currently developed at the Goddard Space Flight Center (GSFC) and is on its way for reaching a TRL of 6 by the end of this year.

We gratefully acknowledge the CosmOrbitrap consortium (LPC2E, LATMOS, LISA, IPAG, IJC Lab, J. Heyrovsky institute of Physical Chemistry), Alexander Makarov (Thermo Fisher Scientific) and the CNES for its technical and financial support.

We acknowledge the CORALS and AROMA teams, the NASA GSFC and the University of Maryland for a very fruitful collaboration.

We also acknowledge the LATMOS and PIIM teams for the production of the Titan' aerosols analogs and Maria Mora from JPL for providing us some Mono Lake samples.

- (1) Waite et al. 2007, Science, 316
- (2) Waite et al. 2009, Nature, 460
- (3) Postberg et al. 2018, Nature, 558
- (4) Briois et al. 2016, Planetary and Space Science, 131
- (5) Selliez et al. 2023, Planetary and Space Science, 225
- (6) Selliez et al. 2019, Planetary and Space Science, 170
- (7) Arevalo et al. 2018, Rapid Communications in Mass Spectrometry, 32
- (8) Selliez et al. 2020, Rapid Communications in Mass Spectrometry, 34
- (9) Ni et al. 2023, Astrobiology, 23
- (10) Willhite et al. 2021, IEEE Aerospace conference
- (11) Szopa et al. 2006, Planetary and Space Science 54
- (12) Preston and Dartnell 2014, International Journal of Astrobiology, 13
- (13) Mora et al. 2022, Astrobiology, 22
- (14) Arevalo et al. 2023, Nature Astronomy, 7
- (15) Southard et al. 2022, AbSciCon conference

OpenPlanetary, an "umbrella" non-profit organisation for open planetary science communities

Benoit Seignovert ^{* 1}, Nicolas Manaud ², Chase Million ³, Trent Hare ⁴,
Mario D'amore ⁵, Michael Aye ⁶, Alessandro Frigeri ⁷, Matt Brealey ⁸,
Mark Wieczorek ⁹, Sehajpal Singh ¹⁰, Julia Maia ⁵, Christian Tai Udovicic ¹¹,
Indhu Varatharajan ¹²

¹ Observatoire des Sciences de l'Univers Nantes Atlantique, Nantes, France – Institut national des sciences de l'Univers, Institut National des Sciences de l'Univers – France

² SpaceFrog Design, Toulouse, France – – – France

³ Million Concepts LLC, Louisville, KY, USA – États-Unis

⁴ U. S. Geological Survey (USGS), Astrogeology Science Center, Flagstaff, AZ, USA – États-Unis

⁵ German Aerospace Centre (DLR), Institute of Planetary Research, Berlin, Germany – Allemagne

⁶ University of Colorado Boulder (USA) – États-Unis

⁷ Istituto Nazionale di Astrofisica (INAF), Rome, Italy – Italie

⁸ Matt Brealey, UK – Royaume-Uni

⁹ Observatoire de la Côte d'Azur, Nice, France – Observatoire de la Cote d'Azur – France

¹⁰ Indian Institute of Technology Bombay – Inde

¹¹ University of Hawaii, USA – États-Unis

¹² Brook University, NY, USA – États-Unis

Introduction: OpenPlanetary, or simply "OP", is an international non-profit organisation that promotes open research in the planetary science and exploration communities: sharing ideas and collaborating on planetary research and data analysis problems, new challenges, and opportunities (1). The organization helps planetary scientists and software developers to share, discuss and improve planetary data, tools, workflows and overall knowledge of our solar system.

OpenPlanetary started in 2015 as a way for participants of the ESA's Planetary GIS Workshop to stay connected and exchange information related to and beyond this workshop. It expanded further by playing a similar role for the second USGS-hosted Planetary Data Workshop (PDW) in 2017. OpenPlanetary has continued to support the biannual PDW and provides a more persistent forum for participants to highlight presented topics and discussions from the workshops.

In 2018, we established OpenPlanetary as a non-profit organisation (Association under 1901 French Law, (2)) in order to provide us with a legal framework to sustainably fund our community framework, projects and activities, and to better serve the planetary science community as a whole. OpenPlanetary is governed by a Board of Directors, elected for two years, which (1) define the policy and general orientation, (2) initiate, endorse, lead, or contribute to the projects and activities, and (3) can make use of the funds of the Association for any endorsed project or activity; the Bureau contains a 3-person subset of the Board members (a president, treasurer, and secretary) and serves as the executive body of the Association.

*Intervenant

Mission: Our mission is to promote and facilitate the open practice of planetary science and data analysis for professionals and amateurs. We do so by organizing events and conducting collaborative projects aimed at creating scientific, technical and educational resources, tools and data accessible to all.

Members and Membership: With currently 800 members across the world, OpenPlanetary membership is free and open to research and education professionals: scientists, engineers, designers, teachers and students, space enthusiasts and citizen scientists (3). Although the early membership had a strong representation in planetary surface and mapping sciences, OpenPlanetary has expanded and is intended to serve as an "umbrella" for all communities of planetary data and tool users, producers or providers across scientific disciplines, space missions or working groups.

Collaboration Platform: Our collaboration platform mainly consists of fully-featured Slack and Github instances. OP members use the OP Slack workspace to stay connected and have real-time discussions with other members (4), and are entitled to request admin rights to host and manage open source projects on OP Github organization (5).

Online Forum: We provide a public online OP Forum for research professionals and amateurs across all planetary science disciplines and communities to find help, share and discuss data, tools, and resources (6). While OP Slack is considered for the more informal discussions, the OP Forum is intended to post Q/A and discussion "gems" from OP Slack, or any resources that would help a broader community (eg: a short tip, a handy how-to guide or a list of curated resources), and that would benefit from having a permanent web-presence and being discoverable by search engines.

Data Cafés: Since 2017, we have organized Data Cafés at scientific conferences for people to meet, share, discuss and solve common challenges and issues related to planetary data handling and analysis. These events follow an "unconference" format allowing and encouraging anyone to propose a topic and lead a group activity (eg: demo, tutorial, hack), or simply to ask for help (7).

Online Events: Unable to continue with the in-person Data Cafés in 2020, we started hosting virtual online events: (1) OPvCon in June 2020 was our first free virtual conference, scheduled in place of the cancelled Planetary Science Informatics and Data Analytics Conference (PSIDA). It consisted of lecture-length talks from invited speakers, networking opportunities, workshops and tutorials, and a hackathon (8), and (2) since March 2020, we have hosted weekly OP Lunch Talks to present and discuss technical topics of interest to the planetary science community (9). Most of these events are recorded and made publicly available on YouTube (10). They now represent a substantial collection of high-quality informational resources and training videos on diverse topics related to planetary science.

Community Projects: Our flagship project is OpenPlanetaryMap (OPM), an open planetary mapping and social platform and effort to foster planetary mapping and cartography on the web for all (11). We also support PlanetaryPy, a community effort to develop a core package for planetary science in Python and foster interoperability between Python planetary science packages (12). A number of other projects not strictly homed under the OP umbrella have arisen from collaborations fostered in OP Slack or during OP Lunch discussion sessions.

Outlook: We held our second yearly OpenPlanetary General Assembly in February 2024, during which a new Board of Directors was elected. Our main focus within the next couple of years is on (1) consolidating and expanding OP Lunch and other virtual activities, (2) increasing the usage and impact of the OP Forum for all communities (eg: Planetary Spatial Data Infrastructures

(SDI) communities), and (3) identifying sustainable funding opportunities.

References: (1) <https://www.openplanetary.org>, (2) https://www.journal-officiel.gouv.fr/associations/detail-annonce/associations_b/20180009/457, <https://www.openplanetary.org/join>, (4) <http://openplanetary.slack.com>, (5) <https://github.com/openplanetary>, (6) <https://forum.openplanetary.org> (7) <https://github.com/openplanetary/data-cafe>, (8) <https://www.openplanetary.org/vcon>, (9) <https://www.openplanetary.org/vlunch>, (10) <https://www.youtube.com/openplanetary>, (11) <https://www.openplanetary.org/opm>, (12) <https://planetarypy.org>

SSHADe-BandList: a database of absorption and Raman bands of solids of planetary interest

Bernard Schmitt *¹, Lucia Mandon[†], Damien Albert, Manon Furrer, Philippe Bollard², Maria Gorbacheva, Lydie Bonal³, Olivier Poch⁴

¹ Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble – Centre National d'Études Spatiales [Toulouse], Centre National de la Recherche Scientifique, observatoire des sciences de l'univers de Grenoble – France

² Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble – Institut National des Sciences de l'Univers, Université Savoie Mont Blanc, Centre National de la Recherche Scientifique, Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement, Université Grenoble Alpes, Météo-France, Institut National des Sciences de l'Univers : UAR832 / UMS832, Centre National de la Recherche Scientifique : UAR832 / UMS832, Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement : UMS1484 – France

³ IPAG – CNRS : UMR5274, Université Grenoble Alpes – France

⁴ Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble (IPAG) – CNRS, Université Grenoble Alpes – France

A critically missing database for the astrophysics and planetary science communities that make spectroscopic observations of solids is a compilation of band parameters (e.g. their position, width, intensity, vibrational modes...) of fundamental solids, for comparison with laboratory and field spectra, and observations of extraterrestrial objects (planetary and small body surfaces, aerosols, grains, ...). While many databases of this type exist for gases (1), there are very few for solids and liquids (mainly in the form of tables of band positions in a few books and review articles), and the attribution of band transition modes is absent or ambiguous.

The Solid Spectroscopy Hosting Architecture of Databases and Expertise (SSHADe) (<https://www.sshade.eu> (2)) hosts data from 30 solid spectroscopy research groups in 15 countries. It provides spectra of solids relevant to astrophysics and planetary sciences (ice, minerals, carbonaceous materials, meteorites, sample returns, etc.) over a wide range of wavelengths (mainly X-rays and VUV up to sub-mm). A first compilation of the "BandList" database (3), which is hosted in SSHADe, was made public in October 2021. This is an ongoing effort to provide the parameters (position, width, intensity, and their variability, shape, etc.) associated with the electronic transitions, intramolecular vibrations and phonon bands of simple solids (ices, simple organics, minerals), in Raman absorption and emission, and for different pressures and temperatures. It also includes sub-bandlists for the different isotopic species involved, as well as the assignment of transition modes. Each band list is compiled on the basis of an exhaustive review of the literature, supplemented by laboratory measurements on well-characterised species. As of May 2024, it included more than 1350 bands associated with 65 different absorption and Raman band lists, including fundamental minerals and ices in different phases.

*Intervenant

[†]Auteur correspondant: lucia.mandon@univ-grenoble-alpes.fr

An efficient online search tool allows users to find specific bands or lists of bands based on information relating to band position, transition type, solid type or composition, chemical bond, etc. Results can be displayed graphically using a spectrum simulator with different units and display options (individual bands, sum of all bands, by isotope...), and data and metadata can be exported in different units and formats for further analysis.

The development of the content of the SSHADE-BandList database is likely to take many years, just to cover the main fundamental ices and minerals identified or suspected in the various astrophysical objects. It is expected that this tool will provide crucial assistance, not only in identifying unknown absorption bands in astrophysical and solar system objects, but also in defining the best spectra to use in radiative transfer models, and in guiding the design of new instruments.

References

- (1) Albert et al. (2020). A decade with VAMDC: results and ambitions. Special issue ‘Development and Perspectives of Atomic and Molecular Databases’, *Atoms*, 8, 76.
- (2) Schmitt et al. (2014), The SSHADE project: an European Database Infrastructure in Solid Spectroscopy. *European Planetary Science Congress 2014, EPSC Abstracts, Vol. 9, EPSC2014-581*, <https://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC2014/EPSC2014-581.pdf>
- (3) Schmitt, B., et al. (2022): SSHADE-BandList, the new database of spectroscopy band lists of solids, Europlanet Science Congress 2022, EPSC2022-778, <https://doi.org/10.5194/epsc2022-778>.

Le Generic PCM : Un modèle de climat planétaire communautaire pour simuler toute la diversité des atmosphères planétaires

Martin Turbet ^{*† 1,2}, François Forget ³, Ehouarn Millour ⁴, Benjamin Charnay ⁵, Jeremy Leconte ⁶, The Generic Pcm Team

¹ Laboratoire de Météorologie Dynamique (UMR 8539) – Institut National des Sciences de l’Univers, Ecole Polytechnique, Ecole des Ponts ParisTech, Sorbonne Université, Centre National de la Recherche Scientifique, Département des Géosciences - ENS Paris, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR8539 – France

² Laboratoire d’Astrophysique de Bordeaux [Pessac] – Université de Bordeaux, Institut National des Sciences de l’Univers, Centre National de la Recherche Scientifique – France

³ Laboratoire de Meteorologie Dynamique (UMR 8539) – Sorbonne Université, École Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris, ENS, PSL Research University, CNRS – France

⁴ Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD) – IPSL CNRS Sorbonne Université – France

⁵ Laboratoire d’études spatiales et d’instrumentation en astrophysique – Institut National des Sciences de l’Univers, Observatoire de Paris, Université Paris Diderot - Paris 7, Sorbonne Université : UMR8109, Centre National de la Recherche Scientifique, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR8109 – France

⁶ Laboratoire d’Astrophysique de Bordeaux – Université de Bordeaux (Bordeaux, France) – France

Fort de notre expérience acquise sur les dix atmosphères planétaires du système solaire, nous avons entrepris depuis plus d’une décennie déjà le développement d’un modèle numérique de climat " universel " tridimensionnel. Ce modèle, récemment renommé " Generic PCM " (Generic Planetary Climate Model), ambitionne de simuler toute la diversité des atmosphères et climats planétaires.

Le Generic PCM s’appuie sur plusieurs décennies de développement de modèles climatiques de la Terre (modèle LMDz) et des planètes du système solaire, avec lesquels il partage une architecture et une large partie de son code informatique. Aujourd’hui, le Generic PCM est porté par une large et dynamique communauté de chercheur.e.s principalement issu.e.s de laboratoires français (LMD, LAB, LESIA, ATMOS).

Le Generic PCM a été largement utilisé pour étudier les atmosphères primitives des planètes et lunes du système solaire. Il a ainsi permis d’obtenir des résultats majeurs pour la résolution du paradoxe du Soleil Jeune sur Terre (Charnay et al. 2013, 2020) et sur Mars (Forget et al. 2013, Turbet et al. 2020, Turbet & Forget 2021), pour l’évolution et l’habitabilité passée de Vénus (Turbet et al. 2021), ou encore sur les climats passés de Titan (Charnay et al. 2014).

En parallèle, le Generic PCM a été largement utilisé pour simuler la diversité des exoplanètes. Sur ces dernières années et pour la première fois au monde, nous avons été en mesure à partir

*Intervenant

†Auteur correspondant: mturbet@lmd.jussieu.fr

du même modèle de simuler le climat de tous les types d'atmosphères d'exoplanètes connues : des rocheuses tempérées (Leconte et al. 2013, Turbet et al. 2018, 2023) aux Jupiters chaudes (Teinturier et al. 2024), en passant par les super-Terres et mini-Neptunes (Charnay et al. 2015, Charnay et al. 2021, Leconte et al. 2024).

Après un bref aperçu du modèle et des briques qui le constituent, je vous présenterai un panorama de ses récentes applications, avec une attention plus particulière sur le cas des planètes et exoplanètes telluriques. Enfin, je présenterai les pistes de développements envisagées du modèle et comment et pourquoi ces développements nous apparaissent cruciaux pour répondre à certaines des questions et besoins scientifiques majeurs sur la thématique des origines.

Observations d'ondes et de particules par Mio/BepiColombo lors de ses survols de Mercure

Sae Aizawa ^{*† 1}, Lina Hadid ¹, Nicolas André ², Dominique Delcourt ¹, Fouad Sahraoui ¹

¹ Laboratoire de Physique des Plasmas – École polytechnique, Route de Saclay, 91128 Palaiseau Cedex, France, Université Paris-Saclay, Sorbonne Universités, CNRS, Institut Polytechnique de Paris – France

² Institut de recherche en astrophysique et planétologie – Institut National des Sciences de l'Univers : UMR5277, Université Toulouse III - Paul Sabatier, Observatoire Midi-Pyrénées, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR5277, Institut National des Sciences de l'Univers, Centre National de la Recherche Scientifique – France

BepiColombo est une mission collaborative entre l'Europe (ESA) et le Japon (JAXA) visant à explorer Mercure avec deux satellites. En raison de l'absence d'une atmosphère épaisse et d'un champ magnétique intrinsèque faible, le plasma du vent solaire, la magnétosphère, l'exosphère et la surface solaire sont étroitement liés. Cette mission, la troisième après Mariner-10 (NASA ; 1973-1975) et MESSENGER (NASA ; 2004-2015), atteindra Mercure en décembre 2025 après une croisière de 7 ans. Elle comporte deux satellites, à savoir : (i) MPO sous responsabilité européenne et qui est dédié à l'observation de la planète, et (ii) Mio (ex-MMO) sous responsabilité japonaise et qui est dédié à l'observation de l'environnement magnétisé de la planète. Pendant toute la phase de croisière, le satellite Mio de BepiColombo est enfoui derrière un bouclier thermique (MOSIF). En raison de cette configuration, tous les instruments à bord de Mio ne sont pas déployés et le champ de vision des instruments à particules est limité. Malgré ces contraintes, les instruments à particules (notamment le spectromètre de masse ionique MSA, l'analyseur d'ions MIA et l'analyseur d'électrons MEA) et les instruments à ondes (fluxmètre alternatif, DBSC) ont réalisé des mesures uniques dans la magnétosphère de Mercure lors des derniers survols de Mercure. Il montre un environnement plasmatique intéressant et la connexion entre la magnétosphère et la surface, en abordant l'altération de l'espace planétaire sur Mercure.

*Intervenant

†Auteur correspondant: sae.aizawa@lpp.polytechnique.fr

Effects of ion irradiation on Mercury terrestrial analogues in the visible to mid-infrared

Emma Caminiti * ¹, Celine Lantz , Sébastien Besse , Rosario Brunetto , Cristian Carli , Lina Serrano , Nicola Mari , Mathieu Vincendon , Alain Doressoundiram

¹ LESIA, Observatoire de Paris – Université de recherche Paris Sciences Lettres (PSL), CNRS, Sorbonne Universités, Université de Paris – France

The spectral (1), compositional (2) and morphological (3) units, defined after the NASA MESSENGER mission, on Mercury's surface are not necessarily correlated. This observation highlights that the composition and morphological properties of the surface are not the only parameters responsible for the spectral diversity. As an airless body, Mercury is subject to space weathering (4), including solar wind ion irradiation, which complicates remote sensing data analyses by modifying the spectral properties of the surface. We present an experimental study (5) performed on Mercury's volcanic surface analogues to provide a better constraint on spectral alterations induced by solar wind. We used 20 keV He⁺ with fluences up to 5E17 ions/cm² to simulate ion irradiation reaching the surface. Terrestrial ultramafic lava already identified as good analogues for Mercury were used: a boninite (6), a basaltic komatiite and a komatiite (7). Spectra were acquired in the visible to mid-infrared (VMIR) wavelength range, between 0.4 and 16 μ m. In the visible to near-infrared samples show an exponential darkening, a reddening and a flattening of spectra. Above 1E17 ions/cm², the exponential darkening reaches a plateau while the reddening and flattening do not show any definable trend. In the mid-infrared, we observe a red-shift of Reststrahlen bands. The Christiansen feature is red or blue-shifted according to the irradiation dose. The spectral alteration is closely influenced by the composition. As Mercury's surface is compositionally heterogeneous, the degree of spectral alteration varies on the planet and putatively participates in the heterogeneous spectral properties of the surface. This work provides ground-truth data for future ESA-JAXA BepiColombo observations. The alteration of VMIR spectral features induced by ion irradiation simulated in the laboratory will be used for future SIMBIO-SYS and MERTIS data analyses.

(1) Murchie et al., 2015

(2) Vander kaaden et al., 2017

(3) Denevi et al., 2013

(4) Domingue et al., 2014

(5) Lantz et al., 2017

*Intervenant

- (6) Mari et al., 2023
- (7) Carli et al., 2013

Do we need a heterogeneous mantle to explain the spectral properties of Mercury's volcanic basin infills?

Emma Caminiti * ¹, Sébastien Besse ², Alain Doressoundiram ³, Jack Wright ²

¹ LESIA, Observatoire de Paris – Université de recherche Paris Sciences Lettres (PSL), CNRS, Sorbonne Universités, Université de Paris – France

² ESA / ESAC – Espagne

³ LESIA, Observatoire de Paris – Université de recherche Paris Sciences Lettres (PSL), CNRS, Sorbonne Universités, Université de Paris – France

Impact basins play a significant role in modifying the surface, notably through the redistribution of material and modification of geological units. In addition, they expose vertical heterogeneities in the crust and allow to reconstruct the subsurface stratigraphy. Volcanism has molded Mercury's surface and considerably modified impact basins after their formation by the emplacement of younger volcanic layers. The study of geological processes such as impact cratering and volcanism provides information on Mercury's evolution. Volcanism has shaped Mercury's surface and considerably modified impact basins after their formation by the emplacement of younger volcanic infills. (1) clarified the volcanic history of the Caloris basin by classifying MESSENGER MASCS footprints according to spectral units (2). We applied this same spectral classification to the Rembrandt basin, improved the classification and characterized a new younger volcanic spectral unit (3) (4). These improvements allow us to distinguish low-reflectance material, high-reflectance red plains, low-reflectance blue plains and intermediate plains as well as to define the younger high-reflectance red plains. We investigated and compared major impact basins on Mercury: Caloris, Rembrandt, Tolstoj, Beethoven and Rachmaninoff. A detailed analysis of each basin allows us to clarify their geological histories including the number of volcanic infillings as well as to confirm that volcanic smooth plains are spectrally heterogeneous (3). Similarities between spatially distributed basins highlight that spectral units associated with basin infills have no spatial and compositional dependence showing no lateral heterogeneity in the mantle. However, it depends on the size of the basin. This could be linked to vertical heterogeneities or different intensities of deep perturbations by impacts leading to different melt production and evolution through time. BepiColombo data are eagerly awaited to investigate the compositional variability of volcanic smooth plains and precise the definition of spectral and morphological units.

(1) Caminiti et al., 2023

(2) Murchie et al., 2015

(3) Helbert et al., 2013

(4) Semenzato et al., 2020

*Intervenant

Simulation de la réponse d'un lidar à forme d'onde

Barron Jean ^{*†} ¹, Frederic Schmidt ¹, François Andrieu ¹

¹ Géosciences Paris Saclay – Institut National des Sciences de l'Univers, Université Paris-Saclay, Centre National de la Recherche Scientifique, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR8148, Université Paris-Saclay : UMR8148, Institut National des Sciences de l'Univers : UMR8148 – France

Mercure est la planète la plus proche du soleil, son atmosphère ténue a pour conséquence que les variations de températures à sa surface sont très importantes entre les périodes diurnes et nocturnes. Ces variations de températures sont également visibles entre l'équateur et les pôles du fait de l'obliquité nulle de la planète. Cette obliquité et la topographie de la planète sont à l'origine de régions à l'ombre permanente notamment au fond des cratères situés à plus de 80°N. De précédentes études, grâce à des modèles thermiques et des observations radar, ont proposé que des glaces occuperaient le fond de ces cratères. Les pôles de Mercure vont être étudiés par la mission BepiColombo, mission conjointe de l'ESA et la JAXA, qui embarque notamment l'instrument BELA, un laser altimètre enregistrant pour la première fois la forme d'onde. Cette forme d'onde peut nous renseigner sur les propriétés du milieu visé par l'instrument. Nous avons développé le modèle WARPE (Waveform Analysis and Ray Profiling for Exploration) qui permet de calculer la forme d'onde pour l'étude des surfaces planétaires notamment des glaces. Ce modèle se base sur une approche Monte Carlo pour simuler les différents processus mis en jeu et leurs effets sur la propagation de la lumière interagissant avec le milieu. Nous avons validé le modèle en le comparant à d'autres simulations de transfert radiatif de référence pour différentes représentations d'une surface planétaire c'est-à-dire un milieu absorbant diffusant avec ou sans interactions à ses interfaces. La prochaine étape consistera à se préparer à l'analyse des vraies données de Mercure.

*Intervenant

†Auteur correspondant: jean.barron@universite-paris-saclay.fr

Caractérisation de la surface lunaire: des photos argentiques Apollo à la réalité virtuelle

Stéphane Le Mouélic * ¹, Mélanie Guenneguez ¹, Harrison Schmitt ², Louis Macquet ¹, Nicolas Mangold ¹, Gwenael Caravaca ³, Benoit Seignovert ⁴, Erwan Le Menn ¹, Laurent Lenta ¹

¹ Laboratoire de Planétologie et Géosciences

[UMR_C6112] – –CNRS, NantesUniversité, CNRS : UMR6112 – –France

² Dept of Engineering Physics, Univ. Wisconsin-Madison, P.O. Box 90730, Albuquerque, NM 87199 – États-Unis

³ Institut de recherche en astrophysique et planétologie – CNRS, Université Paul Sabatier - Toulouse III – France

⁴ Observatoire des Sciences de l'Univers Nantes Atlantique – CNRS – France

12 hommes, dont un géologue, ont marché sur la Lune entre 1969 et 1972. Cette incroyable aventure humaine et scientifique a été documentée à l'aide de photographies argentiques. Ces photographies ont été numérisées méthodiquement au LPI à Houston et mises à la disposition de la communauté, ouvrant la voie à de nouvelles analyses.

Lorsqu'il y a suffisamment de recouvrement entre ces photographies prises au sol, nous avons pu montrer d'une part qu'il est possible de reconstituer numériquement les affleurements géologiques en 3D, à l'aide de la photogrammétrie. D'autre part, parmi les 382 kg d'échantillons lunaires ramenés sur Terre, plusieurs roches ont également été systématiquement photographiées sous plusieurs angles en laboratoire dans les années 1970, avant d'être éventuellement découpées en multiples morceaux pour être analysées. Ces anciennes photographies peuvent également être utilisées pour reconstituer des modèles numériques 3D de ces échantillons de roches lunaires, qui n'existent plus aujourd'hui sous leur forme originelle.

Dans notre étude, nous nous sommes particulièrement intéressés à la " Station 6 " de la mission Apollo 17, un site d'intérêt géologique où les astronautes ont passé plus d'une heure à documenter et échantillonner de gros rochers ayant dévalé une pente du " North Massif " il y a environ 20 millions d'années, et correspondant probablement à des éjectas du bassin Serenitatis. L'archive photographique (154 images des rochers et une trentaine d'images par échantillon de roche) nous a permis de reconstituer l'ensemble du site en 3D. Nous avons ensuite pu intégrer la reconstitution numérique des affleurements rocheux dans une scène collaborative en réalité virtuelle (VR), dans laquelle le contexte a été recréé à partir d'images orbitales de la sonde Kaguya. Dans cette simulation VR, nous avons replacé 3 échantillons de roches lunaires directement à leur place sur les rochers d'origine, à l'endroit exact où elles ont été prélevées par les astronautes.

Ce type de reconstitution en réalité virtuelle peut avoir une utilité à la fois pour la communication vers le grand public, pour l'enseignement ou bien encore pour la recherche. La reconstitution en 3D et l'exploration du site en réalité virtuelle permet notamment de se rendre compte des

*Intervenant

dimensions réelles et de la morphologie des différents éléments. La VR permet également de manipuler et d'étudier les échantillons dans leur contexte initial, facilitant ainsi la compréhension de certains processus comme les effets de l'altération spatiale (impacts des micrométéorites et des particules du vent solaire). On voit ainsi que l'échantillon 76015, une brèche d'impact, présente plusieurs faces caractéristiques, dont une zone sombre probablement liée à la protection d'une anfractuosité de la roche. La connaissance de l'orientation absolue des échantillons pourrait également en théorie servir pour des études paléo-magnétiques.

Ce type de reconstitution en 3D/VR peut également s'appliquer à l'exploration robotique. Elle pourrait être amenée à jouer un rôle majeur en soutien aux opérations des futurs astronautes qui marcheront sur la Lune, notamment dans le cadre du programme Artemis.

Les modèles 3D sont disponibles ici: <https://sketchfab.com/LPG-3D/collections>. La scène de réalité virtuelle est disponible sur SteamVR à cette adresse:

<https://steamcommunity.com/sharedfiles/filedetails/?id=2676700770>

Référence: Le Mouélic et al., Planet. Space Sci., 240, <https://doi.org/10.1016/j.pss.2023.105813>, 2024

Timing of explosive volcanic eruptions on Mercury

Mireia Leon Dasi ^{*} ¹, Sébastien Besse , Lauren M. Jozwiak , Erica R. Jawin , Alain Doressoundiram

¹ LESIA, Observatoire de Paris – Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS, Sorbonne Université – France

Explosive volcanic activity on Mercury extended after the end of the widespread effusive volcanism era (Jozwiak et al., 2018). The specific eruption timing for individual pyroclastic deposits remains largely debated and holds significant implications for the planet's volatile content and thermal evolution. This work explores the relative timing of explosive eruptions by analyzing the relationship between the morphological degradation of the vents and the spectral changes in the associated deposits. We find that the pyroclastic deposits exhibit a wide range of spectral properties, typically characterized by increased brightness, a red spectral slope, and a curved spectrum compared to the average surface. The study shows a correlation between the deposit spectra and the vent degradation, characterized by a rapid initial darkening and spectral flattening over time, followed by stabilization. The deposits with heavily degraded vents reach the properties of the local background terrain, rendering old deposits spectrally undetectable. To explain these temporal variations in spectral properties, we propose three potential processes: space weathering, mixing with the underlying terrain, and changes in erupted pyroclast size. Space weathering acts "fast": spectral changes induced by nanophase iron accumulation produced by space weathering on the Moon saturate after ~ 1 Ga (Tai Udovicic et al., 2021). If a similar mechanism is responsible for most of the spectral modifications observed over time, then a large part of explosive eruptions on Mercury could be significantly younger than previously expected. This research provides further insight into Mercury's volcanic history and the processes that have shaped its surface over time.

*Intervenant

Effects of porosity on the spectro-photometric properties of Phobos simulants

Antonin Wargnier ^{*† 1,2}, Olivier Poch ³, Giovanni Poggiali ¹, Thomas Gautier ^{1,2}, Pierre Beck ³, Alain Doressoundiram ¹

¹ Laboratoire d'études spatiales et d'instrumentation en astrophysique – Institut National des Sciences de l'Univers, Observatoire de Paris, Université Paris sciences et lettres, Sorbonne Université, Centre National de la Recherche Scientifique, Université de Paris – France

² LATMOS – Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines (UVSQ) – France

³ Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble (IPAG) – CNRS, Université Grenoble Alpes – France

The origins of Phobos and Deimos, the two moons of Mars, remain uncertain. Two main hypotheses have been proposed to explain their formation. One hypothesis suggests that Phobos and Deimos were formed by a giant impact between Mars and a protoplanet. The other hypothesis proposes that Phobos and Deimos may have been captured primitive asteroids such as D-type asteroids. The JAXA Martian Moon eXploration (MMX) mission (3) will be pivotal to unveil the origins of Phobos and Deimos. The composition of Phobos will also be studied by the infrared spectrometer MIRS (4). Remote-sensing observations are sometimes challenging to interpret due to the influence of multiple cumulative effects on the near-infrared spectra of planetary surfaces, including observation geometry, grain size, and porosity. The aim of this study was to gain further insight into how the bulk porosity of Phobos regolith influences its spectro-photometric properties (5,6).

Porous samples were created by mixing Phobos simulant grains with water that was frozen into liquid nitrogen. This process resulted in the formation of water ice particles within which the sample was trapped (7). The water ice was then sublimated in a cryogenic vacuum chamber, to finally obtain a highly porous sublimation residue.

The spectroscopic properties in the visible and near-infrared (0.5-4.2 μm) show no strong variations between the porous and the compact simulants. However, one simulant exhibits a bluing of its spectral slope after increasing porosity. This is a particularly important property because it implies that porosity may be one of the parameters that could explain the difference between the blue and red units observed on Phobos. In the mid-infrared range, the Christiansen feature is altered and the emissivity peak is larger for porous samples, leading to the formation of a 10 μm -plateau due to silicate absorption.

The photometry study reveals a modification in the phase reddening behavior between the compact and the sublimation residue, as well as a modification in the phase curve. The derivation of the Hapke parameters shows an increase in roughness for the porous sample, as expected by the macro-roughness visible by optical microscope images; but no modification of the opposition effect in contrast to what might have been expected with the modification of the surface texture.

*Intervenant

†Auteur correspondant: antonin.wargnier@obspm.fr

This study provides new insights into the understanding of spectro-photometric modifications induced by porosity and surface roughness, in the context of the upcoming JAXA/Martian Moon eXploration mission.

References: (1) Hartmann, W. K. (1990) *Icarus*, 87, 236. (2) Rosenblatt, P. (2016) *Nature Geosci.*, 9, 581. (3) Kuramoto K. et al. (2022) *Earth, Planets and Space*, 74, 12. (4) Barucci M. A. et al. (2021) *Earth Planets Space*, 73, 211. (5) Miyamoto, H. et al. (2021) *Earth, Planets and Space*, 73, 214 (6) Wagnier, A. et al. (2023) *MNRAS*, 524, 3. (7) Poch, O. et al. (2016) *Icarus*, 267.

Liste des participants

- Abello Alex
- Afroz Nusrat
- Agusta Vera Christanti
- Ait Oufella Lounis
- Aizawa Sae
- Amit Hagay
- Barron Jean
- Beaunay Stéphanie
- Belissa Victor
- Bernard-Salas Jeronimo
- Bertrand Tanguy
- Bezos Antoine
- Bibring Jean-Pierre
- Blanc Evan
- Bomblet Maëlle
- Bon Mathilde
- Bonnet Gibet Valentin
- Bordiec Maï
- Bouffard Mathieu
- Boutreux Clara
- Boyet Maud
- Bray Lauriane
- Caminiti Emma
- Carlot Noémie
- Carpy Sabrina

- Cavalié Lison
- Chaolin Zhang
- Charnay Benjamin
- Chatain Audrey
- Chaverot Guillaume
- Choblet Gael
- Civet François
- Clodoré Laura
- Conan Lucile
- Conway Susan
- Cordier Daniel
- Cottin Herve
- Cousin Agnes
- Danger Grégoire
- De Batz De Trenquelléon Bruno
- Decocq Emeline
- Delarue Camille
- Doressoundiram Alain
- Douçot Thomas
- Dulieu François
- Dumoulin Caroline
- Duprat Jean
- Eckstein Paul
- Ercicek Fatma
- Falco Aurélien
- Ferraton Alain
- Forget François
- Foucher Frédéric
- Fouchet Thierry
- Fourgeaud Lola
- Freissinet Caroline
- Gautier Thomas

- Genin Emma
- Ghorbel Halima
- Gouzy Simon
- Govekar Théo
- Grau Galofre Anna
- Guerlet Sandrine
- Guillemin Jean-Claude
- Guillot Tristan
- Guimpier Anthony
- Guivel Christèle
- Hendecourt (d') Louis
- Hallé Titouan
- Harel Ludivine
- Hassan Loni Ali
- He Zili
- Henri Pierre
- Jabaud Benoit
- Kervazo Mathilde
- Kinsumuna Hondi Orlène
- Lagain Anthony
- Lange Lucas
- Langlais Benoit
- Lantz Cateline
- Lapp Elisabeth
- Le Becq Noé
- Le Deit Laetitia
- Le Gall Alice
- Le Menn Erwan
- Le Mouélic Stéphane
- Leclef Apolline
- Lefevre Maxence
- Lefour Camille

- Lellouch Emmanuel
- Leon Dasi Mireia
- Leseigneur Yann
- Leseigneur Guillaume
- Lévêque Pauline
- Lévesque Maëva
- Loizeau Damien
- Mangold Nicolas
- Maratrat Louis
- Marcq Emmanuel
- Martinez Léo
- Massé Marion
- Mauger Théo
- Megevand Valentine
- Mergny Cyril
- Millan Maëva
- Millour Ehouarn
- Moisan Enora
- Montabone Luca
- Morbidelli Alessandro
- Motte Mikael
- Mousis Olivier
- Munoz-Iglesias Victoria
- Musseau Yann
- Néri Adrien
- Oudart Nicolas
- Pequeur Louise
- Perrin Clément
- Phan Pierre-Louis
- Pinceloup Mathis
- Pochat Stephane
- Quesnel Yoann

- Quillent-Elinguel Nino
- Rambaux Nicolas
- Rannou Pascal
- Remusat Laurent
- Rondeau Benjamin
- Rosenblatt Pascal
- Roskosz Mathieu
- Rosset Lucie
- Sabbah Hassan
- Schmidt Frédéric
- Schmitt Bernard
- Scordia Léo
- Seignovert Benoît
- Selliez Laura
- Seydoux-Guillaume Anne-Magali
- Sohier Oriane
- Sotin Christophe
- Spiga Aymeric
- Terra-Nova Filipe
- Thebault Erwan
- Tobie Gabriel
- Turbet Martin
- Veret Tom
- Vettier Ludovic
- Vignon Pierre-Antoine
- Villette Justine
- Vinatier Sandrine
- Wagnier Antonin
- Wu Yuchun
- Zanda Brigitte
- Zanetta Pierre-Marie

Liste des auteurs

Abello, Alex, 97
Achilles, Cherie, 82
Afonso, Carlos, 53
Agusta, Vera Christanti, 16
Aizawa, Sae, 148
Albert, Damien, 144
Alemanno, Giulia, 117
Aléon-Toppani, Alice, 134
Amit, Hagay, 15, 37
Andrieu, François, 56, 81, 152
André, Nicolas, 45, 148
Antoine, Martinez, 119, 126
Appéré, Thomas, 38
Arevalo, Ricardo, 139
Artoni, Riccardo, 46, 50
Aye, Michael, 141

Baas, Andreas, 21
Bachelet, Cyril, 134
Baklouti, Donia, 43, 134
Bardyn, Anaïs, 43
Barsuglia, Matteo, 132
Beck, Pierre, 25, 156
Behoukova, Marie, 48
Belgacem, Inès, 56
Belissa, Victor, 60
Benedix, Gretchen, 75
Benoit Lamaitrie, Philippe, 134
Bentley, Mark, 81
Bernard, Sylvain, 79
Bertran, Sandrine, 117, 122
Bertrand, Guillaume, 129
Bertrand, Tanguy, 23, 36, 42
Besse, Sébastien, 149, 151, 155
Beyssac, Olivier, 79
Bezoz, Antoine, 29
Bibring, Jean-Pierre, 17, 135
Bierjon, Antoine, 84
Billebaud, Françoise, 132
Blanc, Evan, 62
Blanco, Stéphane, 101
Boffa Ballaran, Tiziana, 31
Boissinot, Alexandre, 126
Bollard, Philippe, 144
Bollengier, Olivier, 53
Bolmont, Emeline, 6, 124
BOMBLED, Maëlle, 3
BONAL, Lydie, 144
Bonhommeau, David, 38
Bonnefoy, Léa, 98

Bouffard, Mathieu, 37, 55, 132
Boulesteix, David, 67
Bouley, Sylvain, 79
Bourçois, Jérôme, 134
Boutreux, Clara, 20
Bower, Dina, 82
Boyet, Maud, 27
Brealey, Matt, 141
Brighi, Emile, 137
Briois, Christelle, 43, 139
Bristow, Charles, 21
Brockmann, Patrick, 20
Brunetto, Rosario, 134, 135, 149
Buch, Arnaud, 67
Bujoli, bruno, 53
Butcher, Frances, 62
Bézard, Bruno, 101, 109, 113

Cadek, Ondrej, 37
Caminiti, Emma, 149, 151
Caravaca, Gwenaël, 153
Carli, Cristian, 149
Carpy, Sabrina, 21, 23
CARRASCO, Nathalie, 4, 12
Carrasco, Nathalie, 3, 14, 38
Carrion-Gonzalez, Oscar, 7
Carré, Matthieu, 20
Carter, John, 25, 92
Cavalié, Thibault, 7, 10
Champallier, Rémi, 53
Champollion, Nicolas, 132
Chantel, Julien, 31
Charnay, Benjamin, 4, 42, 146
Chatain, Audrey, 12, 14, 98, 103, 107
Chaufray, Jean-Yves, 84, 126
Chauviré, Boris, 25
Chaverot, Guillaume, 6
Choblet, Gaël, 37, 48
Ciarletti, Valérie, 137
Cipriani, Fabrice, 84, 126
CIVET, François, 129
Clarke, Lionel, 129
Claudin, Philippe, 21, 23
Clement, Jean-Baptiste, 65

Climactions, IPSL, 131
 Clochez, Charlotte, 129
 Clément, Noé, 7
 Colin, Fabrice, 139
 Conan, Lucile, 117, 122
 Conway, Susan, 46, 50, 62, 68, 72, 77, 87, 90, 96
 Cordier, Daniel, 38
 Costard, Kevin, 129
 Cottin, Hervé, 43
 Courrech du Pont, Sylvain, 21
 Cours, Thibaud, 99
 Cousin, Agnès, 63
 Cruz Mermy, Guillaume, 56

 D'Amore, Mario, 141
 Daniel, Frost, 31
 Day, Mackenzie, 21
 de Batz de Trenquelléon, Bruno, 4, 42, 109, 111, 115
 De Jesus, Rachel, 139
 De Sousa Feliciano, Ana Carolina, 36
 DELARUE, Camille, 39
 Delcourt, Dominique, 148
 Desjean, Marie-Christine, 84
 Dionnet, Zélia, 134
 Djouadi, Zahia, 134
 Doressoundiram, Alain, 149, 151, 155, 156
 Drant, Thomas, 4
 Dulieu, François, 41
 Dumoulin, Caroline, 48, 118, 121, 124

 Eckstein, Paul, 23
 elliot, mary, 16, 20
 Engrand, Cécile, 43
 Es-sayeh, Maël, 109
 Ewing, Ryan, 21
 Eymet, Vincent, 101

 Fairweather, John, 75
 Falco, Aurélien, 42, 131
 Farla, Robert, 31
 Feuchtgruber, Helmut, 10
 Fisher, Henning, 43
 Fletcher, Leigh, 10
 Forest, Vincent, 101
 Forget, Francois, 42, 76, 84, 126
 Forget, François, 65, 146
 Fouchet, Thierry, 10
 Fournier, Richard, 101
 Franz, Gerhard, 25
 Fray, Nicolas, 43
 Freissinet, Caroline, 67, 97, 100, 103

 Frigeri, Alessandro, 141
 Furrer, Manon, 144

 Gadal, Cyril, 21
 Garnier, Philippe, 45
 gattacceca, jérôme, 33
 Gaubicher, Bertrand, 139
 GAUTIER, Thomas, 103, 156
 Gauvain, Alexandre, 65
 Generic PCM team, The, 146
 Genin, Emma, 68
 Ghorbel, Halima, 3
 Gillmann, Cedric, 124
 Gorbacheva, Maria, 144
 Gouzy, Simon, 25
 GOVEKAR, Théo, 67
 Govekar, Théo, 97
 Grau Galofre, Anna, 60, 62, 70–72
 Groussin, Olivier, 45
 Guenneguez, Mélanie, 153
 Guerlet, Sandrine, 7
 GUILBERT-LEPOUTRE, Aurélie, 45
 Guillot, Tristan, 9
 Guivel, Christèle, 29
 Gunn, Andrew, 21

 hadid, Lina, 148
 Hamm, Vincent, 135
 HAMMOUDA, Tahar, 27
 Hardy, Antoine, 132
 Hare, Trent, 141
 Hartogh, Paul, 10
 HE, Zili, 101
 Helbert, Jörn, 117, 122
 Hennebelle, Patrick, 132
 Henri, Pierre, 45
 Hewins, Roger, 79
 Hilchenbach, Martin, 43
 Holler, Bryan, 36
 Hornung, Klaus, 43
 Howard, Alan, 71
 Huang, Qian, 92
 HUSSEIN-BASSIA, Issa, 99
 Hénault, Elsa, 134

 Iversen, Jens Jacob, 23

 Jabaud, Benoît, 46, 50
 Jawin, Erica R., 155
 Jaziri, Adam Yassin, 4, 12, 14
 Jean, Barron, 56, 152
 Johnson, Sarah, 82
 Jozwiak, Lauren M., 155

Kervazo, Mathilde, 48
 Khomenko, Vladimir, 25
 Kinsumuna Hondi, Orlène, 103
 Kite, Edwin, 90
 Knudson, Christine, 82

 La, Carole, 29
 Lagain, Anthony, 75
 Lagouanelle, Paul, 105
 Lai, Dexin, 119
 Lange, Lucas, 76
 Langlais, Benoit, 15
 Lantz, Cateline, 77, 134, 135, 149
 Lapotre, Mathieu G. A., 21
 Lara, Luisa, 122
 Lasue, Jeremie, 122
 LAVOISE, Julie, 139
 Lavvas, Panayotis, 36
 LE BECQ, Noé, 46, 50, 72, 87
 Le Deit, Laetitia, 90
 Le Gall, Alice, 105, 137
 Le Hir, Guillaume, 4
 LE MENN, Erwan, 46, 153
 Le Menn, Erwan, 53
 Le Mouélic, Stéphane, 153
 Le Pivert-Jolivet, Tania, 135
 Le Saux, Arthur, 7
 Lebonnois, Sebastien, 101, 119, 126
 Lebonnois, Sébastien, 111, 115
 Lebreton, Jean-Pierre, 139
 Leclef, Apolline, 77
 Leconte, Jeremy, 7, 146
 Ledu, Dominique, 134
 LEFEVRE, Maxence, 117, 119
 Lefour, Camille, 10
 Lefèvre, Franck, 4, 65, 84, 126
 Leliboux, Thomas, 4
 Lellouch, Emmanuel, 7, 10, 36, 109
 Lenta, Laurent, 153
 Leon Dasi, Mireia, 155
 Lequertier, Guillaume, 135
 Leroux, Hugues, 79
 LIGER-BELAIR, Gérard, 38
 LIU, Yang, 92, 96
 Livingstone, Ian, 21
 Loizeau, Damien, 135
 Lourit, Lionel, 135
 Luo, Yangcheng, 65
 Lustrement, Benjamin, 117, 122
 Lévesque, Maëva, 121
 Lévêque, Pauline, 53
 Lézin, Maxime, 29

 Macquet, Louis, 153
 Maia, Julia, 141
 Malarewicz, Virgile, 79
 Man, Lianjie, 31
 Manaud, Nicolas, 141
 Mandon, Lucia, 144
 Mangold, Nicolas, 60, 68, 72, 90, 92, 153
 Maratrat, Louis, 12, 14, 103
 MARCQ, Emmanuel, 101, 117, 122
 Mari, Nicola, 149
 Marrocchi, Yves, 53
 Martinez, Léo, 81
 Marty, Jean-Charles, 121
 MASSE, Marion, 77
 Massol, Hélène, 56
 Mathé, Christophe, 113
 Maurice, Maxime, 65
 Mbitkeu-Njeuya, Marcelle Rolande, 23
 McAdam, Amy, 82
 Melwani, Mohit, 55
 Mergny, Cyril, 56
 Merlin, Frederic, 36
 Merrison, Jonathan, 23
 Michaut, Chloé, 19
 Milcareck, Gwenaél, 7
 Millan, Maëva, 67, 82
 Million, Chase, 141
 Millour, Ehouarn, 7, 42, 65, 84, 126, 146
 Mivumbi, Obadias, 134
 Moisan, Enora, 98, 107
 Montabone, Luca, 84, 86
 Montmessin, Franck, 84, 126
 Morbidelli, Alessandro, 13
 moreno, raphael, 7, 10
 Motte, Mikael, 29
 Mourtaday, Nada, 101
 Murray, Katherine, 36
 MUSSEAU, Yann, 124
 Mussetta, Mathilde, 82
 Määttänen, Anni, 101
 Méheut, Héloïse, 132

 Naar, Joseph, 65
 Narteau, Clément, 21
 Navaro, Philippe, 23
 Nesvorny, David, 13
 Nixon, Connor, 109
 Noblet, Axel, 62
 Nyffenegger-Pere, Yaniss, 101
 Néri, Adrien, 31

 Oudart, Nicolas, 137

Pan, Lu, 92
 Paquette, John, 43
 Parmentier, Marie-Laure, 132
 Pasquon, Kelly, 77
 Peng, Han, 119
 Perret, Laurent, 23
 Petitjean, Patrick, 132
 Phan, Pierre-Louis, 128
 PHAN, Thi Hai Van, 25
 Pierron, thomas, 65, 84, 126
 Pilorget, Cédric, 135
 Pinceloup, Mathis, 15, 55
 Pinilla-Alonso, Noemi, 36
 Poch, Olivier, 144, 156
 Poggiali, Giovanni, 156
 Poulet, François, 135

 Queffélec, Clémence, 53
 Quesnel, Yoann, 33

 Radebaugh, Jani, 21
 Raffin, Scot, 98, 107
 Rambaux, Nicolas, 128
 RANNOU, Pascal, 4, 99, 101, 109, 111, 115
 Revol, Alexandre, 124
 Reynard, Bruno, 34, 39
 Richard, Patrick, 46
 Riu, Lucie, 135
 Rochette, Pierre, 34
 RODRIGUEZ, Sébastien, 101, 109
 Rondeau, Benjamin, 25
 Rosenblatt, Pascal, 118, 121
 ROSSET, Lucie, 111
 Rouanet, Nicolas, 117
 Rubin, David, 21
 Ryno, Jouni, 43

 Sahraoui, Fouad, 148
 Sansberro, Inès, 43
 Schmidt, Frederic, 56, 81, 152
 schmitt, bernard, 144
 Schmitt, Harrison, 153
 Schmitz, Isabelle, 53
 Scordia, Léo, 87
 Seignovert, Benoit, 141, 153
 SELLIEZ, Laura, 139
 Serrano, Lina, 149
 Servis, Konstantinos, 75
 Seydoux-Guillaume, Anne-Magali, 34
 Sharan, Shivangi, 15
 Singh, Sehajpal, 141
 Slodczyk, Aneta, 53
 SOHIER, Orianne, 12, 14, 103

 Sotin, Christophe, 39, 53
 Soto, Alejandro, 98, 107
 Southard, Adrian, 139
 Spiga, Aymeric, 7, 65, 84, 107, 126
 Stansberry, John, 36
 Stenzel, Oliver, 43
 Styczinski, Marshall, 55
 Szopa, Cyril, 67, 97
 Séon, Thomas, 38

 Tai Udovicic, Christian, 141
 Talbot, Hugues, 81
 Telfer, Matt, 21
 Tellmann, Silvia, 118
 Tenelanda, Laura, 59
 Terra-Nova, Filipe, 37
 Thirkell, Laurent, 43, 139
 Thébault, Erwan, 15
 TOBIE, Gabriel, 37, 46, 48, 50, 58, 124
 turbet, martin, 6, 65, 146

 UEHARA, Minoru, 33

 Van Hooslt, Tim, 58
 Vance, Steven, 55
 Vandaele, Ann Carine, 117, 122
 Vandergucht, David, 129
 Varatharajan, Indhu, 141
 Vatant d'Ollone, Jan, 111
 Verhoeven, Olivier, 15
 Vettier, Ludovic, 3, 12, 14, 103
 Villanueva, Geronimo, 36
 Villette, Justine, 90
 Vinatier, Sandrine, 101, 113, 122
 Vincendon, Mathieu, 77, 149
 Vinogradoff, Vassilissa, 25
 Vos, Eran, 65

 Wan, Linfeng, 36
 Wagnier, Antonin, 156
 West, Robert, 109
 Wiczorek, Mark, 141
 Wong, Xi, 36
 Woo, Jason, 13
 Wright, Jack, 151
 Wu, Xing, 92
 Wu, Yuchun, 92

 Xiang, Zhou, 94
 Xing, Wu, 94

 Yang, Liu, 94
 Yongliao, Zou, 94

Zanda, Brigitte, 79
Zanetta, Pierre-marie, 34
ZHANG, Chaolin, 96
Zou, Yongliao, 92

