



Université Claude Bernard



Lyon 1

# DIPLÔME NATIONAL DE DOCTORAT

(Arrêté du 25 mai 2016)

Date de la soutenance : **16 septembre 2021**

Nom de famille et prénom de l'auteur : **Monsieur MILLOT Cédric**

Titre de la thèse : « *Topographie et propriétés thermiques des versants martiens à écoulements saisonniers* »

## Résumé



Depuis l'arrivée des missions *Mariner* dans les années 60 et la révélation de réseaux de vallées de grande échelle, il est admis que la planète Mars a connu un passé ancien relativement humide. Toutefois, ce n'est plus le cas aujourd'hui, en témoignent la sécheresse extrême de son atmosphère, composée à plus de 95% de CO<sub>2</sub> et environ 0.03% d'H<sub>2</sub>O, (e.g. Owen et al., 1977) ainsi que l'environnement désertique qui s'offre aux quelques *rovers* martiens, dont le paysage est dominé par des champs de dunes et autres tourbillons de poussières. Toutefois, en 2011, la communauté scientifique « martienne » a connu un regain d'intérêt autour de la problématique de l'eau liquide actuelle. Des processus de pente inconnus jusqu'alors sont identifiés par la caméra de haute précision HiRISE (McEwen et al., 2007). Ces processus, appelées *Recurring Slope Lineae* (ou RSL, McEwen et al., 2011), se présentent sous la forme de traces sombres et allongées dans la direction de la pente, qui grandissent pendant une période de l'année, puis disparaissent partiellement ou complètement et ce, de façon récurrente année après année. Les périodes d'allongement ont d'ailleurs été rapportées comme étant corrélées avec les saisons les plus chaudes de Mars (e.g. Ojha et al., 2014). Cette saisonnalité et ce comportement si singulier sur Mars ont interrogé les scientifiques : s'agit-il de la manifestation contemporaine d'écoulements d'eau liquide ? Ou bien ces structures ont-elles une autre origine ? Différentes hypothèses ont été présentées au cours de ces dernières années. La première moitié de la décennie (2011-2015 environ) a été dominée par des mécanismes humides (fonte de glace d'eau, déliquescence de sels, origine souterraine...), tandis que les années 2016-2020 ont été dominées par les hypothèses sèches (e.g. Dundas et al., 2020), notamment face aux incompatibilités entre les prévisions de variations de propriétés thermiques attendues avec la présence d'eau et les données relevées (e.g. Edwards et al., 2016). La fin de l'année 2020 et le début de l'année 2021 présente des résultats assez nuancés sur l'origine des RSL : le consensus scientifique sur le mécanisme de déclenchement de ces processus est encore loin d'être établi. Les questions autour desquelles cette thèse s'articule sont celles des propriétés thermiques, et notamment des valeurs de température de surface et de subsurface, au niveau des zones à RSL, pour différents sites connus. Quelles sont les valeurs de températures de surface et de

subsurface et comment varient-elles dans l'espace et dans le temps ? Est-ce que ces variations sont compatibles avec un mécanisme tel que la fonte de la glace d'eau ?

Le chapitre 1 présente une vue d'ensemble du système Mars, à travers l'étude du passé ancien de la planète rouge, vraisemblablement plus humide et chaud qu'actuellement, mais aussi une description du système climatique actuel, notamment à travers l'étude de processus de surface analogues aux RSL.

Le chapitre 2 est un état de l'art de la problématique des RSL, de 2011 à 2021. Il traite notamment de l'ensemble des propriétés répertoriées pour les RSL, de leur distribution spatiale à leur morphologie, en passant par leur saisonnalité, mais aussi des confrontations entre les différents modèles explicatifs tout au long de cette décennie de débats intenses. Il présente également les questions-clefs auxquelles ce manuscrit cherche à répondre.

Le chapitre 3 décrit les données d'imagerie utilisées dans l'étude des RSL, en se concentrant notamment sur les images de la caméra HiRISE ainsi que les Modèles Numériques de Terrain (MNT) dérivés de ces images. Ces données sont traitées dans des logiciels de Système d'Information Géographique (SIG) ou utilisées comme données d'entrée dans un modèle thermique adapté à l'étude des RSL.

Ce modèle thermique est décrit dans le chapitre 4 de ce manuscrit, où l'ensemble des flux radiatifs qui entrent en jeu dans la balance d'énergie qui s'exerce à la surface de la planète est détaillé. Le jeu de paramètres utilisé est également décrit, de même que les hypothèses et approximations du modèle.

Le chapitre 5 reprend les résultats présentés dans notre article (Milot et al., 2021), présentant à la fois une étude quantitative sur la géomorphologie et l'évolution temporelle de différents sites à RSL mais aussi une étude thermique à partir du modèle thermique exposé dans le chapitre 4.

Les chapitres 6 et 7 s'attachent à des problématiques à la périphérie de celle des RSL : ils se concentrent sur les incertitudes soulevées par les études de la topographie à petite échelle. Le chapitre 6 se penche exclusivement sur les problèmes de pentes et d'orientation, calculées à partir des données de MNT, et dresse un état de l'art des différentes méthodes de calcul de ces paramètres, ainsi que de leurs limites. Le chapitre 7 traite de la quantification des incertitudes sur les valeurs de pente, en fonction des erreurs verticales d'un MNT, par une approche numérique mêlant données synthétiques et estimations statistiques des incertitudes de calcul.

Enfin, le chapitre 8 dresse un bilan général des résultats de la thèse et présente des ébauches de quelques projets, notamment sur les propriétés thermiques de la surface vues par la sonde *Trace Gas Orbiter* (TGO), ou l'influence de topographies de petite échelle sur les valeurs de températures de surface ou sur la circulation des vents locaux.

Les résultats importants de ce travail de thèse sont présentés ici. Tout d'abord, l'activité des RSL relevée pour les différents sites de notre étude semble incohérente avec des processus de fonte de glaces, qu'elle soit pure ou en contact avec des sels particuliers. Les périodes d'allongement prédites par notre modèle ne correspondent pas avec les périodes d'allongement relevées, ce qui suppose que le déclenchement des écoulements n'obéit pas à des contraintes thermiques. Nos interprétations du phénomène suggèrent que les processus de mécanismes secs avancés par Schmidt et al., 2017, Vincendon et al., 2019 ou Dundas et al., 2020 sont préférables face aux contraintes de la plupart des mécanismes humides. Il a également été relevé que des topographies de petite échelle (chenaux de taille métrique) sont parfois associées aux morphologies des RSL. Ces topographies ont une influence sur l'insolation locale, et probablement sur les valeurs de température de surface. Les estimations des incertitudes de pente locales sont directement

dépendantes du ratio entre l'erreur verticale et la taille d'un pixel pour un MNT donnée. Les incertitudes sont également fonctions de la pente moyenne : les plus fortes erreurs sont restreintes aux terrains les plus plats, et peuvent atteindre 8-9° pour les MNT HiRISE, avec des valeurs pour les pentes moyennes entre 4 et 6°. Pour les autres caméras étudiées (MOC, CaSSIS et HRSC), les erreurs maximales sont autour de 4°, tandis que pour des valeurs de pente moyennes, les incertitudes sont plutôt de l'ordre de 2-3°.

Les objectifs définis par le groupe d'analyse pour l'exploration spatiale martienne (MEPAG) comprennent notamment la recherche de traces de vie dans les milieux où il y a une présence d'eau liquide : si la preuve définitive était apportée que de l'eau liquide était présente au sein des RSL, cela aurait de grandes implications sur nos connaissances de l'habitabilité de Mars. Nos conclusions semblent indiquer que l'eau ne joue pas un grand rôle dans l'activité relevée, même si l'absence de corrélation ne suggère forcément l'absence d'eau au sein de ces phénomènes. De nouveaux protocoles doivent être développés pour estimer quels mécanismes secs sont susceptibles de produire les RSL, avec la saisonnalité que nous observons.