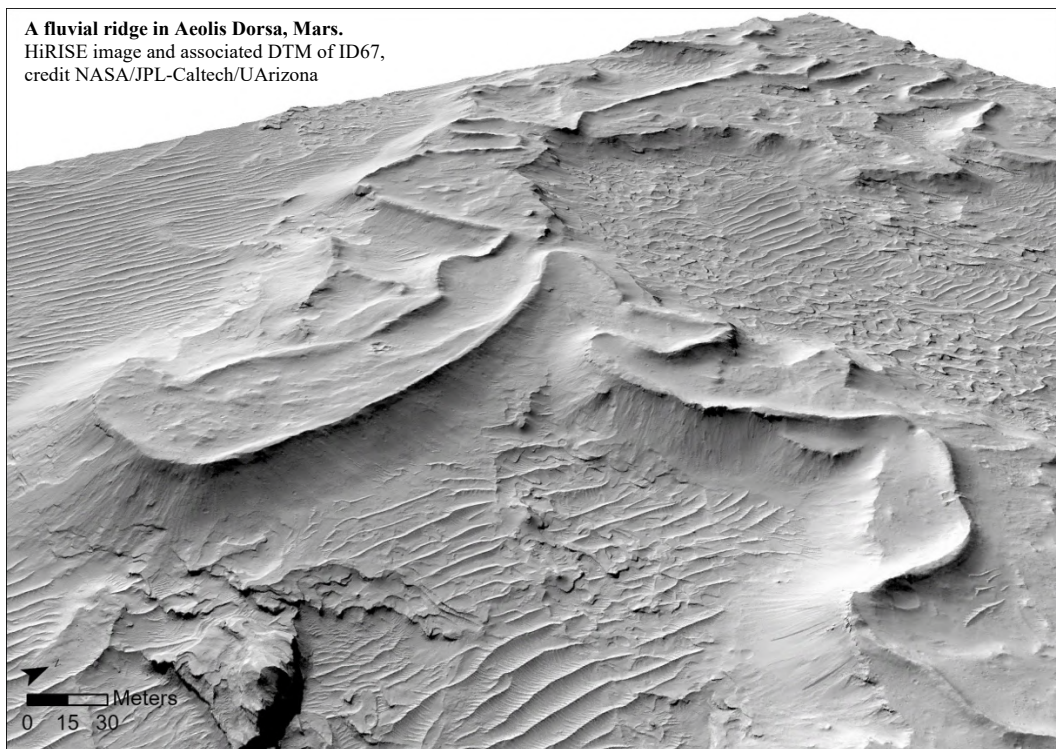


# Constraining Early Martian Hydrological History through Analysis of Fluvial Ridges



Master in Earth Sciences

By Gaia Pillinini

Under the direction of  
Director: Prof. Sébastien Castelltort  
Main Supervisor: Dr. Abdallah Zaki  
Expert: Dr. Stéphane Pochat

Université de Lausanne,

Signature of Master's Director:

June 2024

# Abstract

The Martian surface is currently arid, but extensive geomorphic evidence indicates a much more humid past. This hydrological record is preserved in the present-day landscape due to minimal tectonic activity and protracted aeolian erosion in conjunction with mass-wasting processes, which have stabilized Mars' landscapes. The morphological witnesses of ancient water-formed landforms consist of drainage networks, valleys, lakes, and ubiquitous fossilized depositional rivers. These rivers stand as positive topographic ridges on the modern surface due to the erosion of their adjacent floodplains and selective preservation of their channels filled with consolidated sediments, coarse materials, or lava flows. These ridges exist predominantly in late Noachian to young Hesperian terrains, dating approximately 3-4 Ga ago. These fluvial remnants provide us a window into the reconstruction of Mars' humid past, which is fundamental to understanding early Martian climate, its potential habitability, and its link with the early history of our solar system. Thirty-six out of an original set of sixty-eight sinuous ridges were confidently categorized as fluvial. A subset of twelve fluvial ridges were further examined by measuring their length, width, height and caprock thickness using digital elevation models and range 1-100 km long, 20-1000 m wide, 8-90 m tall and 3-11 m thick respectively. We then employ empirical and theoretical relationships developed based on terrestrial alluvial systems and adapted to Mars' physical environment to estimate a critical hydrological parameter: discharge. Paleodischarge was calculated for twelve fluvial ridges in three main regions: Aeolis Dorsa, Arabia Terra, and the surroundings of Margaritifer Terra. The results point to channel-forming discharge values of 120–1130 m<sup>3</sup>/s and are consistent with other studies using caprock thickness but show variability compared to width-based methods, which often overestimate discharge. The mean percentage difference between the two methods is

116% (ranges 40 to 193%) with a tendency to increase as the fluvial ridge width increases. Caprock thickness is preferred for discharge calculations rather than width because it is not affected by lateral river migration and scarp retreat processes, and it provides better constrained estimates. The findings suggest Mars experienced significant but not extreme fluvial activity, impacting our understanding of its climatic and environmental history. Two peaks of increased fluvial activity, consistent with other studies, were identified: in the Middle Noachian and during the transition from the Hesperian to the Amazonian. When comparing the discharge estimates and river geometries to terrestrial rivers, we find that Mars' rivers might have experienced a sustained and long-lived fluvial history, necessary for the formation of large depositional rivers. This supports the possibility of a prolonged period of habitable conditions on the early Martian surface.

**Keywords :** Mars, Fluvial Ridges, Paleodischarge, Caprock, Inversion Process

# Résumé

Mars est actuellement aride, mais de nombreuses preuves géomorphologiques indiquent un passé beaucoup plus humide. Ce registre hydrologique est préservé dans le paysage actuel en raison d'une activité tectonique minimale et d'une érosion éolienne prolongée, associées à des processus de mouvements de masse qui ont stabilisé les paysages de Mars. Les témoins morphologiques de ces anciennes formations façonnées par l'eau comprennent des réseaux de drainage, des vallées, des lacs et des rivières fossilisées. Ces rivières apparaissent en tant que rides topographiques positives sur la surface actuelle en raison de l'érosion de leurs plaines d'inondations adjacentes et de la préservation sélective de leurs chenaux, remplis de sédiments consolidés, de matériaux grossiers ou de coulées de lave. Ces rides se trouvent principalement dans les terrains de la fin du Noachien au début de l'Hespérien, datant d'environ 3 à 4 milliards d'années. Ces vestiges fluviaux ouvrent une fenêtre sur la reconstitution du passé fluvial de Mars, ce qui est fondamental pour comprendre le climat Martien primitif, son potentiel dans le développement de la vie et son lien avec l'histoire ancienne de notre système solaire. Trente-six des soixante-huit rides sinueuses originales ont été catégorisées de manière confiante comme fluviales. Un sous-ensemble de douze rides fluviales a été examiné plus en détail en mesurant leur longueur, largeur, hauteur et épaisseur de leur couverture rocheuse à l'aide de modèles numériques d'élévation. Ces rides varient entre 1 et 100 km de long, 20 à 1000 m de large, 8 à 90 m de haut et 3 à 11 m d'épaisseur, respectivement. Nous utilisons ensuite des relations empiriques et théoriques développées à partir des systèmes alluviaux terrestres puis adaptés à l'environnement physique de Mars pour estimer un paramètre hydrologique critique : le débit. Le paléo-débit a été calculé pour douze rides fluviales dans trois régions principales : Aeolis Dorsa, Arabia Terra, et les environs de Margaritifer Terra. Les résultats indiquent des

valeurs de débit formant des chenaux allant de 120 à 1130 m<sup>3</sup>/s et sont cohérents avec d'autres études utilisant l'épaisseur de la couverture rocheuse mais montrent une variabilité par rapport aux méthodes basées sur la largeur, qui surestiment souvent le débit. La différence moyenne en pourcentage entre les deux méthodes est de 116 % (allant de 40 à 193 %) avec une tendance à augmenter à mesure que la largeur de la ride fluviale augmente. L'épaisseur de la couverture rocheuse (*caprock*) est préférée pour les calculs de débit plutôt que la largeur car elle n'est affectée par la migration latérale des rivières et les processus de recul de l'escarpement et fournit des estimations plus contraintes. Les résultats suggèrent que Mars a connu une activité fluviale significative mais non extrême, ce qui impacte notre compréhension de son histoire climatique et environnementale. Deux pics d'une activité fluviale accrue, cohérents avec d'autres études, ont été identifiés : au milieu du Noachien et pendant la transition de l'Hespérien à l'Amazonien. En comparant les estimations de débit et les géométries des rivières à d'analogues terrestres, nous constatons que les rivières martiennes ont pu connaître une histoire fluviale soutenue et durable, nécessaire à la formation de grandes rivières de dépôt. Cela soutient la possibilité d'une période prolongée de conditions habitables à la surface martienne primitive.

**Mots clés :** Mars, Rides Fluviales, Paléo-débit, Couverture rocheuse, Processus d'Inversion