

**Offre de thèse** : Lois de comportements pour les régolithes glacés : de Mars aux lunes de Saturne

**Lieux du stage** : Université Gustave Eiffel, IFSTTAR, Campus de Nantes, laboratoire MAST/GPEM, Allée des Ponts et Chaussées, 44344 Bouguenais ; Laboratoire de Planétologie et Géodynamique, UMR-CNRS 6112, 2 rue de la houssinière, 44322 Nantes

**Encadrement** : Riccardo Artoni (GPEM) (dir.) Patrick Richard (GPEM) / , Gabriel Tobie (LPG) (co-dir), Erwan Le Menn (LPG)

**Collaboration** : Gaël Choblet (LPG), Susan Conway (LPG), Sabrina Carpy (LPG)

**Contexte** : Les surfaces de nombreux corps planétaires du système solaire sont recouvertes de glaces granulaires résultant de variétés de processus (condensation/sublimation, bombardement météoritique, transport éolien etc.). Ces matériaux granulaires qui ont une distribution de taille très fine (poudres) sont caractérisés par une forte cohésion interne due aux forces de van der Waals [Andreotti et al. 2013]. Cela leur donne un comportement mécanique particulier, permettant de stabiliser des empilements peu denses qui peuvent s'effondrer suite à l'application d'une contrainte. Ce type de matériaux granulaire cohésif détermine les propriétés physiques des sols glacés de nombreux corps planétaires. On peut noter en particulier Encelade, petite lune de Saturne, où des éruptions et dépôts associés de grains de glace particulièrement fins ont pu être observés [Porco et al. 2006, Jaumann et al., 2008 ; Taffin et al. 2012], ou bien plus proche de nous, Mars où des écoulements surfaciques de glace poudreuse ont été observés au niveau de la calotte polaire nord [Russel et al., 2008].

Deux missions in situ sont actuellement en cours de développement par la NASA, une première vers la lune Titan (Mission Dragonfly), une seconde vers la lune Europe (Mission Europa Lander). Anticiper les propriétés de ces sols glacés est essentiel pour minimiser les problèmes techniques que pourraient rencontrer ces futures missions [Konstantinidis et al. 2018].

**Sujet** : Dans ce contexte, l'objectif de cette thèse est de développer des connaissances sur le comportement mécanique de matériaux granulaires constitués de poudre de glace à travers la mise en œuvre de simulations numériques discrètes mettant en jeu des grains cohésifs, et des expériences en chambre froide. Le but ultime est de comprendre la stabilité du matériau en relation aux écoulements surfaciques, à un impact (atterrissage), et au forage. Ce projet s'inscrit dans le projet GRIM porté par le laboratoire GPEM (Granulats et Procédés d'Elaboration des Matériaux) de l'IFSTTAR et le LPG (laboratoire de Planétologie et Géodynamique, Université de Nantes & CNRS) dans le cadre de l'appel à projet « Paris scientifiques en Pays de la Loire », qui soutient des sujets émergents, fondamentaux et transdisciplinaires. Le projet vise à combiner l'expertise du GPEM sur la rhéologie des matériaux granulaires et ses applications à celle du LPG sur la caractérisation des interactions surface-intérieur des corps glacés.

D'un point de vue expérimental, une technique de fabrication de poudres de glace avec une distribution de taille contrôlée sera développée. Les poudres seront caractérisées avec une boîte de cisaillement pour poudres, qui sera adaptée aux contraintes de température, et installé dans la chambre froide du LPG. Cet outil permettra de caractériser notamment les

paramètres de plasticité [Molerus 1975] en fonction de la contrainte de consolidation, de la distribution de taille, de la forme des particules, de leur composition (présence de poudre de roche). Les paramètres obtenus (coefficient de frottement effectif, paramètre de cohésion, densité à l'état critique), donneront lieu à une quantification de la coulabilité des poudres (en référence à la mise en écoulement) et fourniront un jeu de données pour valider les simulations discrètes. Les expériences seront dans un premier temps menées à des températures de -30/-20°C, accessibles dans la chambre froide du LPG, qui sont pertinentes pour les applications industrielles et martiennes. Par la suite, la mise en place d'un système de refroidissement sera développée, pour pouvoir atteindre des températures plus basses, potentiellement jusqu'à 80 K représentatives de la surface des lunes de Saturne.

L'activité numérique consistera en la mise au point d'un modèle discret reproduisant les propriétés des poudres en question. Pour ce faire, un modèle de force cohésive interparticules construit en considérant la nature des matériaux (polydisperses, multicomposants) et des interactions (force électrostatiques, de van der Waals, ...) sera intégré dans un code de calcul développé par le laboratoire GPEM. Des premières simulations visant à reproduire les expériences en boîte de cisaillement serviront à valider le modèle et ajuster les paramètres des modèles d'interaction. Une fois validé, le modèle numérique sera utilisé pour simuler des conditions d'écoulement complexes comme (1) la déstabilisation d'une pente, inspirée par des problèmes d'écoulement en surface et (2) l'impact d'un corps, inspiré par des problématiques d'impact ou compression localisée et (3) le forage en utilisant différentes techniques (percussion vs. Rotation).

**Profil :** Les candidats doivent être titulaires d'un Master 2 de physique, mécanique, sciences de la Terre et des Planètes, ou équivalent. Ils doivent être motivés par les approches couplant des expériences avec des simulations numériques, et leurs applications à des problématiques planétologiques.

### **References :**

Andreotti, B., Forterre, Y., & Pouliquen, O. (2013). *Granular media: between fluid and solid*. Cambridge University Press.

Jaumann, R., Stephan, K., Hansen, G. B., Clark, R. N., Buratti, B. J., Brown, R. H., ... & Coradini, A. (2008). Distribution of icy particles across Enceladus' surface as derived from Cassini-VIMS measurements. *Icarus*, 193(2), 407-419.

Konstantinidis, K., Adler, J., Thies, M., & Förstner, R. (2018, March). Simulation of precise and safe landing near a plume source on Enceladus. In 2018 IEEE Aerospace Conference (pp. 1-15). IEEE.

Molerus, O. (1975). Theory of yield of cohesive powders. *Powder Technology*, 12(3), 259-275.

Porco, C. C., Helfenstein, P., Thomas, P. C., Ingersoll, A. P., Wisdom, J., West, R., ... & Kieffer, S. (2006). Cassini observes the active south pole of Enceladus. *Science*, 311(5766), 1393-1401.

Russell P., N. Thomas, S. Byrne, K. Herkenhoff, K. Fishbaugh, N. Bridges, C. Okubo, M. Milazzo, I. Daubar, C. Hansen, A. McEwen (2008), Seasonally active frost-dust avalanches on a north polar scarp of Mars captured by HiRISE, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L23204

**Contact :** [riccardo.artoni@univ-eiffel.fr](mailto:riccardo.artoni@univ-eiffel.fr) ; [Gabriel.Tobie@univ-nantes.fr](mailto:Gabriel.Tobie@univ-nantes.fr)