

Soutenance de thèse

Cecily SUNDAY soutiendra sa thèse de doctorat, préparée au sein de l'équipe d'accueil doctoral ISAE-ONERA PSI et intitulée «*Atterrissage, enfoncement et roulage sur la surface de petits corps du système solaire*»

Le 28 avril 2022 à 13h00, salle des thèses de l'ISAE-SUPAERO

devant le jury composé de

Mme Naomi MURDOCH	Ingénieure de recherche ISAE-SUPAERO	Directrice de thèse
M. Hirdy MIYAMOTO	Professor University of Tokyo	Rapporteur
M. Olivier BARNOUIN	Professor The Johns Hopkins University	Rapporteur
Mme Alice QUILLEN	Professor University of Rochester	
M. Patrick MICHEL	Directeur de recherche Laboratoire Lagrange	Co-directeur de thèse
Mme Lydie STARON	Chargée de recherche Institut d'Alembert	
M. Derek RICHARDSON	Professor University of Maryland	
M. David MIMOUN	Professeur ISAE-SUPAERO	

Résumé : Les petits corps célestes sont d'un grand intérêt pour la communauté scientifique. L'histoire de leur évolution reflète les mécanismes qui ont conduit à la formation de notre système solaire. Grâce à plusieurs missions récentes visant ces corps, nous avons pu visiter et explorer une poignée de petits corps et, par conséquent, avons acquis une meilleure compréhension de leurs propriétés dynamiques et de surface. Les astéroïdes que nous avons pu visiter à ce jour sont recouverts d'un matériau granulaire meuble appelé régolithe. Les matériaux granulaires présentent des comportements notoirement complexes sur Terre. Par exemple, ils peuvent transitionner entre les états solides, liquides et même quasi-gazeux lorsqu'ils sont agités par une force externe. Même si les interactions granulaires sont soumises aux mêmes lois de contact sur les petits corps que sur Terre, on ne sait toujours pas comment la résistance et les comportements d'écoulement du matériau évoluent réellement avec la gravité. Comprendre le lien entre la gravité et la dynamique granulaire est essentiel pour l'interprétation correcte des événements d'impact et de l'histoire géologique des petits corps en général, afin de déterminer les origines des traits uniques du terrain et, bien sûr, pour prédire le résultat des opérations in situ lors des missions vers des petits corps. Dans cette thèse, nous examinons la dynamique des interactions lentes et granulaires sur les surfaces des petits corps. Le travail est motivé par la mission Martian Moons eXploration, qui visitera les deux lunes de Mars et déploiera un rover roulant à la surface de Phobos. Nous étudions comment la faible gravité sur Phobos pourrait influencer le comportement d'atterrissage, d'enfoncement, et de roulement du rover, en supposant que la surface est recouverte d'un fin régolithe. Nous commençons par présenter un code que nous utilisons pour effectuer des simulations numériques, selon la méthode des éléments discrets (sphère molle). Dans le cadre de cette thèse, le code a été fortement modifié et validé. Ensuite, nous analysons les collisions à faible vitesse en utilisant les résultats d'expériences en tour de chute et de simulations numériques. Nous constatons que le comportement de collision évolue avec le rapport entre les forces d'inertie et les forces gravitationnelles dans le système, et nous développons un nouveau modèle de collision théorique qui peut être utilisé pour prédire le résultat d'une collision lente pour n'importe quel niveau de gravité. Ensuite, nous nous concentrons sur les interactions granulaires dans le régime quasi-statique, et nous simulons l'enfoncement du rover. Nous comparons les modèles d'enfoncement du domaine de la terramecanique aux modèles de la théorie de traînée granulaire, et nous montrons comment les deux théories prédisent que l'enfoncement statique est indépendant de la gravité. Enfin, nous menons des expériences et des simulations avec une seule roue de rover, et nous évaluons les performances de conduite en fonction de la vitesse et de la gravité. Encore une fois, nous observons que le comportement de roulement est lié au rapport entre les forces d'inertie et les forces gravitationnelles du système. Cette thèse montre comment

la gravité influence les comportements solides et fluides d'un matériau granulaire, offrant une nouvelle perspective sur la façon d'interagir avec le régolithe lors des futures missions vers des petits corps.

Mots-clés : astéroïde, simulation, mécanique, Phobos, mission spatiale

Summary: Even though observations from the Earth have revealed the great number and diversity of small bodies (asteroids and comets) in the Solar System, only an in-situ exploration of these bodies, accompanied if possible by a sample return, can answer many of the open questions today about their physical and chemical composition. This explains the resurgence of missions dedicated to small bodies (OSIRIS-REx, Hayabusa-2, Mars Moon Explorer, etc.) and the efforts of international space agencies (ESA, NASA, JAXA, DLR, CNES) to explore their surfaces. Asteroids (e.g. Eros), comets (e.g. Churyumov-Gerasimenko), and small satellites (e.g. the Martian moon Phobos) prove to be difficult candidates for surface mobility due to their low gravity (100 to a million times lower than the gravity of the Earth, g). In milli-gravity (i.e. around $10^{-3} g$), the very low weight of a vehicle means that the traction is 1,000 times lower than that of the Martian and lunar rovers. Additionally, the behaviour of the regolith (the layer of more or less fine grains found on the surface of these bodies) of the small bodies is poorly understood and is, therefore, difficult to predict. This is especially true because the properties of the regolith are often unknown before we arrive at the body, and also due to the potentially major role played by cohesive forces at these levels of gravity: the behaviour of the regolith may actually be more like that of a cohesive powder than that of a fine gravel. This thesis will, therefore, explore the feasibility and the expected performance of a wheeled vehicle on the surface of a small body. The study will be based on soil modeling using discrete element methods (DEM). This approach consists in simulating the detailed interaction between individual regolith grains (friction, rolling resistance, cohesion, etc.). From a pre-existing DEM code that will be identified at the beginning of the study, the thesis will examine and implement the necessary modifications to model the specific interactions of a wheel with the regolith of a small body. Once the modeling step has been completed, the thesis will apply the tool developed to solve the problem of rolling: traction and (simplified) maneuverability in different types of regolith, at different levels of gravity. During this thesis, we will tackle the following questions: what is the traction force that one can expect from a regolith in milligravity? How does this traction evolve when gravity changes? How do the characteristics of the regolith flow and the resulting tracks at the surface vary with the regolith properties? How do the cohesion of the regolith and the wheel geometry affect the flow around the wheel? These studies will allow us to determine the minimum gravity threshold, depending on the expected regolith, below which rolling becomes impracticable or too inefficient to be preferred to other solutions such as Mascot hoppers (DLR), Hedgehog (JPL) or Minerva (JAXA).

Keywords: mechanics, asteroid, simulation, Phobos, space mission