

Soutenance de thèse

Paolo GUARDABASSO soutiendra sa thèse de doctorat, préparée au sein de l'équipe d'accueil doctoral ISAE-ONERA ACDC et intitulée «*Étude de la dynamique et de l'environnement cislunaire pour la gestion des débris spatiaux*»

Le 30 juin 2023 à 9h00, salle des thèses, ISAE-SUPAERO

devant le jury composé de

M. Grégoire CASALIS	Professeur ISAE-SUPAERO	Directeur de thèse
M. Roberto ARMELLIN	Professeur University of Auckland	Rapporteur
M. Enrico STOLL	Professeur Technische Universität Berlin	Rapporteur
Mme Stéphanie LIZY-DESTREZ	Professeure associée ISAE-SUPAERO	Co-directrice de thèse
Mme Camilla COLOMBO	Associate Professor Politecnico di Milano	
M. Joan-Pau SANCHEZ CUARTIELLES	Professeur ISAE-SUPAERO	

Résumé : Les performances opérationnelles des avions sont l'un des facteurs clés de la rentabilité des compagnies aériennes et de la satisfaction des usagers. Au même titre que la sécurité et les performances techniques, les performances opérationnelles des avions doivent être anticipées dès les premières étapes du développement afin de concevoir un avion qui puisse répondre pleinement aux exigences opérationnelles. La capacité d'un avion à répondre aux exigences opérationnelles est appelée 'Le projet de recherche interdisciplinaire DASCOD (Dynamics, Analysis and Simulation of Cislunar Orbital Debris) est principalement motivé par l'intérêt croissant pour la Lune au cours des dernières années, la création de nouveaux programmes d'exploration et l'implication d'acteurs privés. Une approche solide et cohérente d'atténuation des débris doit accompagner cette croissance pour éviter de créer un environnement hostile. À cette fin, l'objectif principal est d'étudier l'environnement dynamique de l'espace cislunaire, défini au sens large comme la région d'influence gravitationnelle Terre-Lune. Dans un premier temps, le travail fournit un aperçu des missions passées, présentes et futures autour de la Lune, servant de repérage préliminaire pour les stratégies d'élimination en fin de vie (ou en absence de vie). Les sujets Cislunar Space Debris Mitigation (CSDM) et Cislunar Space Situational Awareness (CSSA) sont introduits, offrant un aperçu du cadre réglementaire actuel et des solutions proposées. Ensuite, le mouvement dans la région Terre-Lune a été modélisé à l'aide du modèle CR3BP (Circular Restricted Three-Body Problem), en accédant aux solutions périodiques de ce modèle. Ces solutions ont été transférées à des modèles plus fidèles pour produire un ensemble de données de conditions initiales appropriées pour les simulations de ce travail. Une attention particulière a été accordée à la dépendance de ces modèles à l'époque initiale, en trouvant une stratégie pour découpler les conditions initiales et les temps. Le problème de la réduction des débris pour les missions cislunaires a été abordé sous différents angles. Premièrement, les options d'élimination disponibles ont été identifiées pour les engins spatiaux actifs en fin de vie. Des propagations multiples ont permis la composition de cartes illustrées pour évaluer la disponibilité et la robustesse de telles possibilités pour certaines études de cas. Plusieurs directions ont été prises en compte dans les balayages de grande grille, recherchant des familles de trajectoires avec un comportement similaire au lieu d'un mouvement chaotique. Ensuite, la fragmentation des engins

spatiaux a été considérée comme le mécanisme principal et le plus probable de génération de débris dans l'espace cislunaire. Le Standard Break-up Model (SBM) de la NASA a été mis en œuvre et adapté aux travaux actuels, garantissant la conservation de la masse et de la quantité de mouvement lors d'explosions. Ensuite, un tel événement est positionné à plusieurs endroits de départ pour plusieurs époques, offrant un aperçu de ses conséquences.

Mots clés : dynamique multi-corps, exploration lunaire, débris spatiaux

Summary: The main goal of this interdisciplinary research project is to map orbits in the cislunar space in order to assess their long-term evolution and identify available spacecraft disposal options; this is necessary to mitigate the collision risk in cislunar space as well as in Earth orbits, and the on-ground risk for population and property on the Earth surface [1]. An increasing interest in enlarging humankind's influence in space has motivated agencies and companies to study and design new missions towards the Moon [2]. While access on the surface is of clear interest, numerous space agencies are planning on building an orbital station around the Moon, thanks to the heritage of the International Space Station (ISS). This station will be positioned in a Near Rectilinear Halo Orbit around the Moon [3], and will serve as a gateway to the satellite's surface, but also to Mars and outer space [4]. A new space economy is likely to emerge, bringing a plausible increase in traffic towards the Moon in the coming years [5]. Orbital dynamics in the cislunar space cannot be studied with conventional keplerian mechanics, as the influences of both the Earth and the Moon affect the motion of an object in what is defined the "N-body problem" [6]. In cislunar space, these peculiar and chaotic laws of motion apply to any object, and for this reason spacecraft will be provided with propulsion systems able to perform the required station keeping [7]. But what happens to any malfunctioning spacecraft or artificial debris that is produced and left in one of these trajectories? What would be the best practice to safely dispose of spacecraft, such as transport modules (which for the ISS are destroyed thanks to the Earth's atmosphere), in cislunar space? Around the Moon, the current solution for disposal of lunar spacecraft has been the natural de-orbiting and subsequent impact on the surface that incurs for low orbits with high instability, but research has not yet looked thoroughly into disposal options in higher lunar orbits, which are the ones that are likely to present the higher traffic. Moreover, following recent guidance for the protection of historical sites and potential human settlements, disposal on lunar ground would require at least some element of control. Finally, establishing rules for the disposal of spacecraft will surely influence the design of the future missions towards the Moon [8]. This research proposes to extend the systematic mapping approach used around the Earth [9]. Using long-term propagation in non-keplerian, multi-body orbital dynamics, it will be possible to create a dynamic cartography of the cislunar space. Based on different future lunar traffic scenarios, the lunar and cislunar debris environment will be simulated, and different disposal strategies will be proposed with the aim of providing the technical foundations to establish guidelines for future lunar missions. A case study focused on Cubesats constellations in cislunar space will be developed, considering deploying, orbit maintenance and disposal strategies. Europe wants to take an integral part in Moon exploration. There is a genuine interest to explore the technical disposal options in order to prepare with a clear position towards upcoming standardisation and best practices, also considering that disposal strategies in the lunar environment have not yet been thoroughly addressed. Bibliography [1] F. Letizia, C. Colombo, J. Van Den Eynde, R. Armellini, and J. Rüdiger, "SNAPPSHOT : Suite for the numerical analysis of planetary protection," 2016. [2] B. Hufenbach et al., "International missions to lunar vicinity and surface - Near-Term mission scenario of the global space exploration roadmap," 2015. [3] R. J. Whitley et al., "Earth-Moon Near Rectilinear Halo and Butterfly Orbits for Lunar Surface Exploration," 2018. [4] M. Lo and S. Ross, "The Lunar L1 Gateway : portal to the stars and beyond," Pasadena, CA : Jet Propulsion Laboratory, National Aeronautics and Space Administration, 2001., Aug. 2001. [5] I. A. Crawford, "Lunar resources: A review," Prog. Phys. Geogr., vol. 39, no. 2, pp. 137–167, 2015. [6] W. S. Koon, M. W. Lo, J. E. Marsden, and S. D. Ross, Dynamical Systems, the Three-Body Problem and Space Mission Design. 2009. [7] D. Guzzetti, E. M. Zimovan, K. C. Howell, and D. C. Davis, "Stationkeeping analysis for spacecraft in lunar near rectilinear halo orbits," Adv. Astronaut. Sci., vol.

160, no. May, pp. 3199–3218, 2017. [8] R. Jehn and F. Renk, “Impact of Space Debris Mitigation Requirements on,” no. June, pp. 1–5, 2017. [9] A. J. Rosengren, D. K. Skoulidou, K. Tsiganis, and G. Voyatzis, “Dynamical cartography of Earth satellite orbits,” *Adv. Sp. Res.*, vol. 63, no. 1, pp. 443–460, 2019.

Keywords: multi-body dynamics, Moon exploration, space debris