



THESE DE DOCTORAT DE

NANTES UNIVERSITE
FACULTY OF MATHEMATICS
AND PHYSICS, CHARLES UNIVERSITY

ECOLE DOCTORALE N° 596

Matière, Molécules, Matériaux et Géosciences

Spécialité : Sciences de la Terre et des planètes

Par

Martin KIHOULOU

Déformation des lunes de glace induite par des variations du flux de chaleur provenant de l'océan

Thèse présentée et soutenue à Prague, le 28 août 2025

Unité de recherche : Laboratoire de Planétologie et Géosciences – UMR 6112

Department of Geophysics

Rapporteurs avant soutenance :

Ana-Catalina PLESA
Thibault DURETZ

Chercheur, German Aerospace Center, Institute of Space Research
Professeur, Goethe University Frankfurt

Composition du Jury :

Président : Hana ČÍŽKOVÁ
Examinateurs : Doris BREUER
Stéphane LABROSSE
Ana-Catalina PLESA
Thibault DURETZ
Dir. de thèse : Gaël CHOBLÉT
Co-dir. de thèse : Ondřej ČADEK

Professeur, Department of Geophysics, Charles University
Professeur, German Aerospace Center, Institute of Space Research
Professeur, CNRS, ENS Lyon
Chercheur, German Aerospace Center, Institute of Space Research
Professeur, Goethe University Frankfurt
Directeur de Recherche, CNRS, Nantes Université
Professeur, Department of Geophysics, Charles University

Titre : Déformation des lunes de glace induite par des variations du flux de chaleur provenant de l'océan

Mots clés : lunes de glace ; modélisation numérique ; rhéologie visqueux, élastique et plastique ; déformation tectonique ; transition de phase

Résumé : Plusieurs lunes de glace de Jupiter et de Saturne abritent des océans d'eau liquide sous leur croûte de glace, offrant ainsi un environnement potentiellement habitable, voire une opportunité pour l'émergence de la vie en dehors de la Terre. La lune de glace Titan possède une atmosphère dense et des lacs d'hydrocarbures liquides en surface, mais il reste incertain comment les éléments volatils sont transportés depuis l'intérieur de la lune à travers une croûte de glace épaisse de 100 km. Des études récentes ont révélé (i) un effet important de la température de fusion dépendante de la pression (effet DAL) sur la convection à l'état solide et (ii) des variations à grande longueur d'onde du flux de chaleur océanique façonnées par la circulation océanique. Dans cette thèse, nous modélisons la croûte de glace comme un système thermodynamique ouvert pouvant échanger à la fois de l'énergie et de la matière avec l'océan souterrain. Nos résultats montrent comment le caractère de ces échanges de matière dépend du régime de transfert thermique et de l'amplitude de l'effet DAL, et que de grandes topographies ($\gtrsim 100$ m) peuvent être observées en surface uniquement si la croûte de glace est dans un régime conductif. De plus, motivés par des indices de disparition de surface de type subduction sur la lune glacée la plus active géologiquement, Europe, nous modélisons la compression latérale de la croûte de glace. Nous surveillons le devenir de la glace proche de la surface, qui pourrait transporter des produits radiolytiques oxydants vers l'océan souterrain. Les résultats indiquent que l'efficacité de l'enfoncement dépend principalement de l'épaisseur de la croûte de glace. Si celle-ci est mince ($\lesssim 10$ km), la glace proche de la surface peut être acheminée vers l'océan souterrain en moins de 2 millions d'années. En outre, nous modélisons la réponse de l'hydrosphère d'Europe aux variations à long terme de son excentricité orbitale. Lors des périodes d'augmentation de l'excentricité, la croûte de glace fond sous l'effet d'une production de chaleur accrue, atteignant une épaisseur aussi faible que 5 km. Pendant cet amincissement, les contraintes de compression proches de la surface atteignent facilement la limite de rupture, ce qui suggère que la croûte de glace devrait se fracturer et qu'un processus de type subduction pourrait se produire. Ce scénario appuie non seulement le modèle de ce processus, mais est également cohérent avec d'autres indices d'une croûte mince dans un passé récent, tels que l'absence de grands cratères d'impact et le décalage latéral entre les segments des différentes failles. Selon la fréquence de ces événements et le taux de production d'oxygène, l'océan souterrain pourrait recevoir suffisamment d'oxygène pour alimenter des réactions rédox.

Title : Deformation of icy moons induced by heat flux variations from the ocean

Keywords : icy moons, numerical modeling, visco-elasto-plasticity, tectonic deformation, phase transition

Abstract : Several icy moons of Jupiter and Saturn harbor liquid water oceans beneath their icy shells, offering possibly habitable environment or even an opportunity for the emergence of life outside the Earth. Icy moon Titan possesses a dense atmosphere and liquid hydrocarbon lakes on its surface, yet it remains unclear how are the volatiles transported from the moon's interior through a 100-km-thick ice shell. Recent studies revealed (i) an important effect of the pressure-dependent melting temperature (DAL effect) on the solid-state convection and (ii) long-wavelength variations in oceanic heat flux shaped by the oceanic circulation. In this thesis, we model the ice shell as an open thermodynamic system that can exchange both energy and mass with the subsurface ocean. Our results show how the character of material exchange depends on the heat transfer regime and on the amplitude of the DAL effect, and that large topography ($\gtrsim 100$ m) can be observed at the surface only if the ice shell is in conductive thermal state. Furthermore, motivated by indications of subduction-like surface disappearance at the surface of the most geologically active icy moon Europa, we model lateral compression of the ice shell. We monitor the fate of the near-surface ice, which might carry oxidizing radiolytic products to the subsurface ocean. The results indicate that the efficiency of sinking depend mainly on the ice shell thickness. If the ice shell is thin ($\lesssim 10$ km), the near-surface ice can be delivered to the subsurface ocean in less than 2 Myr. In addition, we model the response of Europa's hydrosphere to long-term variations of its orbital eccentricity. During the period of increasing eccentricity, the ice shell melts due to enhanced heat production, reaching a thickness as low as 5 km. During the thinning, compressive stress in the near-subsurface easily reaches the yield stress, which suggests that the ice shell should fracture and the subductionlike process might take place. This scenario not only supports the model of the subduction-like process, but is consistent with other evidence of a thin shell in recent past, such as absence of large impact craters and tidal walking. Depending on the frequency of these events and oxygen production rate, the subsurface ocean might receive enough oxygen to power redox reactions.