

Résumé

Dans notre système planétaire, il existe de nombreux objets connus sous le nom de « lunes glacées ». Plusieurs de ces lunes abritent un océan souterrain composé principalement d'eau liquide, ce qui permet aussi de classer ces lunes comme « mondes océans ». Les petites lunes glacées, comme Encelade et Europe, sont composées d'un océan souterrain situé entre une couche de glace à la surface et un noyau rocheux, ce qui permet de fortes interactions eau-roche qui en font des objets intéressants à étudier pour la recherche de vie dans le système solaire. Cependant, sur les grandes lunes glacées comme Ganymède et Titan, une couche de glaces de haute pression existerait entre l'océan et le noyau à cause des hautes pressions expérimentées par ces lunes, composées d'une hydrosphère très épaisse. A première vue, cette couche de glace empêche un contact direct ainsi que les échanges de sels entre le noyau rocheux et l'océan. Par conséquent, la question qu'on se pose est : « Ces échanges sont-ils possibles et peuvent-ils être efficaces ? »

Cette thèse se concentre sur différents aspects du problème qui n'ont pas été considérés par les quelques précédentes études sur le sujet. Tout d'abord, on étudie les effets du changement de phase existant à l'interface entre l'océan et la couche de glace de haute pression. La prise en compte de ce changement de phase modifie radicalement la dynamique, permettant une vitesse radiale non nulle à l'interface. On montre que cette condition aux limites facilite la convection et permet à la glace de haute pression, sous certaines conditions et pour divers corps planétaires, de fondre à l'interface avec le noyau rocheux, ce qui favorise les échanges entre le noyau et l'océan.

Nous avons par la suite ajouté des sels dans notre modèle afin d'en étudier les effets sur la dynamique. Les quelques études déjà existantes sur ce sujet se sont concentrées uniquement sur de la glace d'eau pure, alors que les océans de ces lunes sont vraisemblablement composés d'eau salée. Une partie de ces sels pourrait provenir d'interactions avec le noyau, d'où l'importance de considérer ces sels dans nos modèles afin d'étudier l'efficacité de ces échanges. En ajoutant des sels à notre modèle, on montre qu'il existe deux régimes d'évolution des sels dans la couche de glace de haute pression, en fonction de leur effet sur la densité de la glace. On montre également que des échanges efficaces peuvent avoir lieu entre le noyau et l'océan et qu'en fonction du régime dans lequel on se trouve, une quantité significative de sels peut atteindre l'océan. Enfin, les résultats obtenus en ajoutant un flux de sels provenant du noyau rocheux dans la couche de glace de haute pression ont mis en évidence l'existence possible, dans certains cas, d'un mince océan très salé entre le noyau et la glace de haute pression, que nous avons commencé à étudier dans cette thèse.

Abstract

In our planetary system, there are many planetary objects known as icy moons. Several of these moons have a subsurface liquid ocean mainly composed of water, which also classifies them as ocean worlds. Small icy moons, as Enceladus or Europa, are composed of an ocean between an icy surface and a rocky core, allowing strong interactions between liquid water and rocks, which make them interesting for the search for life in the solar system. However, on large icy moons as Ganymede or Titan, a layer of high-pressure (HP) ices may exist between the ocean and the rocky core due to the high pressure experienced by these moons composed of a very deep hydrosphere. At first glance, this layer prevents direct contact and exchanges of salts, and possibly nutrients, between the rocky core and the ocean. Therefore, the question is: are those exchanges possible and could they be efficient?

This PhD thesis focuses on several aspects not considered in the few previous studies carried out on this subject. The first one is the effect of the phase equilibrium at the interface between the high-pressure ice layer and the ocean. It can be modeled as a phase change boundary condition and drastically changes the dynamics, allowing a non-zero radial velocity at the top interface. We show that this boundary condition eases the convection and allows, under certain conditions for various planetary bodies, melt to form at the interface between the core and the high-pressure ice shell, which enhances the exchanges between the core and the ocean.

Secondly, we added salts into our model to study their effect on the overall dynamics. The few studies already existing on this topic focused only on pure water ice, while the oceans of these moons are likely to be composed of salty water. Part of these salts may come from the interactions with the core, hence the importance of studying the efficiency of these exchanges. By adding salts to our model, we show that there are two regimes for how the salts behave in the high-pressure ice layer, depending on how much they affect the ice density. We also show that efficient exchanges of salts can happen through the high-pressure ice shell and that, depending on the regime just mentioned, a significant amount of salts can reach the ocean. Finally, the results obtained by including salts from the core in the high-pressure ice layer highlighted the possible formation of a thin highly-salted basal ocean between the core and the ice, which we started to study in this PhD thesis.