

Titre en français : Modélisation physique d'un écoulement diphasique réactif : vers une dynamo par neige de fer dans les intérieurs planétaires

Titre en anglais : Modeling of multiphase reactive flows : towards dynamo action in planetary interiors induced by iron snow

Nom du directeur de thèse : Benjamin Favier

Tel : 04 13 55 20 52

E-Mail : benjamin.favier@univ-amu.fr

Laboratoire : IRPHE UMR 7342

Financement : demandé

Type de financement : bourse ministérielle

Résumé en français :

Un champ magnétique soutenu par effet dynamo est un ingrédient clé de l'habitabilité d'une planète. Sur la Terre, la dynamo est actuellement due à des mouvements convectifs soutenus par la solidification de son noyau de fer liquide à partir du centre, ce qui libère de la chaleur latente et des éléments légers. Ce modèle de dynamo convective a également été appliqué à de nombreuses configurations planétaires [1]. Il est cependant discutable pour des petites planètes comme Mercure et Ganymède. En raison des pressions réduites par rapport à la Terre, la solidification du fer liquide s'amorce en haut du noyau, ce qui implique que le noyau liquide est stratifié de manière stable [2]. La solidification produit des flocons de fer presque purs qui sont plus denses que le fluide ambiant. Ces derniers sédimentent ensuite vers le centre de la planète, rencontrent des températures croissantes, et finalement refondent à une profondeur donnée. Le fer liquide pur nouvellement formé a une flottabilité négative et coule tout en générant des mouvements convectifs à grande échelle, ce qui pourrait entraîner une action dynamo.

Ce modèle a été étudié numériquement en imposant un flux de flottabilité à une profondeur donnée dans les codes classiques de dynamo convective, imitant le flux de flottabilité de la neige de fer [3,4]. La dynamique de la neige est cependant plus complexe, et pourrait générer des dynamiques bien plus complexes que celles prises en compte dans ces calculs simplifiés. Par exemple, on peut imaginer que la distribution de la taille des flocons de fer entraîne une grande distribution des profondeurs de fusion, les plus gros flocons s'enfonçant plus rapidement et plus profondément. De plus, la dynamique couplée de millions de flocons de neige peut conduire à des mouvements cohérents et générer une agrégation comme la formation de neige dans les nuages [5]. En outre, la dynamique des flocons, même avant la fonte, pourrait soutenir les mouvements des fluides dans la couche stratifiée stable qui participent également à l'action de la dynamo.

Le but de cette thèse est de commencer à déchiffrer la dynamique complexe de la neige de fer grâce à un analogue de laboratoire, en abordant pleinement les problèmes de changement de phase et les flux associés induits par la flottabilité. Nous étudierons la solidification d'une couche d'eau dans une stratification thermique imposée, refroidie par le bas. La limite inférieure sera recouverte d'une fine couche d'eau très salée, pour empêcher la cristallisation. Des cristaux de glace se formeront dans la masse et s'élèveront, entraînant la convection ; cependant, en raison de la stratification thermique stable, la glace s'élèvera dans l'eau plus

chaude et fondra. Ce montage sera installé dans une grande chambre froide (10m³) pour minimiser les pertes de chaleur latérales. Des mesures des fluctuations de température, des vitesses et des distributions de taille des particules seront effectuées. L'effet de la rotation, la modélisation numérique de ces écoulements réactifs multiphasiques et leur inclusion dans les codes numériques géodynamo seront finalement examinés.

Résumé en anglais :

A magnetic field sustained by dynamo action is a key ingredient for a planet's habitability. On Earth today, the dynamo is due to convective motions sustained by the solidification of its liquid iron core from the center, which releases latent heat and light elements. This convective dynamo model has also been applied to numerous planetary configurations [1]; however, it is questionable for smaller planets like Mercury and Ganymede. There, because of reduced pressures compared to Earth, solidification of the liquid iron core proceeds from the top down, meaning that the liquid core is stably stratified [2]. Top-down solidification produces almost pure iron flakes which are denser than the ambient fluid. Iron flakes then sediment towards the planet's center, meet increasing temperatures, and finally remelt at a given depth. The newly formed pure iron liquid is negatively buoyant and sinks while generating large scale convective motions, resulting in dynamo action.

This model has been investigated numerically by imposing a buoyancy flux at a given depth in classical convective dynamo codes, mimicking the buoyancy flux from melting iron snow [3,4]. But the snow dynamics is multiphasic and highly nonlinear, and might generate far more complex flows than those accounted for in these oversimplified, one-fluid computations. For instance, one can imagine that the size distribution of iron flakes leads to a large distribution of melting depths, the larger flakes sinking faster and deeper. Also, the coupled dynamics of the millions of snowflakes might lead to coherent motions and generate aggregation like snow formation in clouds [5]. Besides, the flake dynamics, even before melting, might sustain fluid motions in the stably stratified layer that also participate in the dynamo action.

The purpose of this PhD is to start deciphering the complex dynamics of the iron snow thanks to a laboratory analog, fully addressing phase change problems and associated buoyancy driven flows. We will study the solidification of a layer of water in an imposed thermal stratification, cooled from below. The bottom boundary will be coated with a thin layer of very salty water, to prevent crystallization. Ice crystals will form in the bulk and rise, driving convection; however, due to the stable thermal stratification, the ice will rise into warmer water, and melt. This set-up will be installed in a large cold room (10m³) to minimize lateral heat losses. Measurements of temperature fluctuations, velocities and particle size distributions will be performed. The effect of background rotation, the numerical modeling of such multiphase reactive flows and their inclusion in state-of-the-art geodynamo numerical codes will eventually be considered.

Profil du candidat recherché :

Des connaissances en méthodes expérimentales ne sont pas nécessaires, mais des bases solides en mécanique des fluides fondamentales ainsi qu'un intérêt prononcé pour les sciences géophysiques sont attendus.

Publications sur le sujet :

- [1] Christensen, 2010. Space science reviews, 152(1-4), pp.565-590.
- [2] Rückriemen, Breuer, Spohn, 2015. J. Geophys. Research: Planets, 120(6), pp.1095-1118.
- [3] Vilim, Stanley, Hauck, 2010. J. Geophys. Research: Planets, 115(E11).
- [4] Christensen, 2015. Icarus, 247, pp.248-259.
- [5] Cotton, Tripoli, Rauber, Mulvihill, 1986. J. Climate Applied Meteo., 25(11), pp.1658-1680.

Insertion professionnelle après thèse : publique