



Sujet de thèse (*PhD position*).

Financement ERC acquis (*funded by the European Research Council*)

Directeur de thèse (*Advisor*) : **Michael Le Bars** (Directeur de Recherche CNRS, IRPHE, Marseille)

Co-encadrant (*Co-advisor*) : **Julien Monteux** (Chargé de Recherche CNRS, LMV, Clermont-Ferrand)

Contact : julien.monteux@uca.fr ou 04 73 34 67 38

Laboratoire d'accueil pour la thèse : LMV, Clermont-Ferrand

PhD host laboratory: LMV, Clermont-Ferrand

Méthode: Modélisation numérique/analogique

Methods: Numerical/Analogical modeling

Sujet : Fragmentation du fer dans un océan magmatique : quelle signature géochimique ?

Les datations géochimiques montrent que la séparation Fer/Silicates s'est déroulée pendant ou juste après l'accrétion des planètes du système solaire. Pour la Terre, les âges calculés dépendent fortement des modèles considérés pour la formation du noyau et varient entre 30 et 100 Ma après la formation des premiers solides du système solaire (CAI). Le processus de ségrégation a même pu s'initier dans les premiers embryons planétaires avant l'assemblage final conduisant aux planètes actuelles. Pour qu'une séparation rapide manteau/noyau puisse avoir lieu, il est nécessaire d'invoquer des processus de fusion partiels à complets. Durant les premiers stades de formation des objets telluriques, l'énergie d'accrétion a pu s'ajouter à l'énergie liée au chauffage radioactif provoqué par la désintégration des éléments à courtes périodes (^{26}Al et ^{60}Fe). Cette chaleur primitive a pu provoquer la formation d'océans magmatiques et une fusion plus ou moins complète des manteaux primitifs.

Ces océans magmatiques ont probablement été le siège d'équilibres et de ségrégations plus ou moins complets entre la phase métallique des impacteurs et la phase silicatée fondue du manteau terrestre. Ainsi, des éléments chimiques lithophiles (attirés par la phase rocheuse) et des éléments sidérophiles (attirés par la phase métallique) ont pu être échangés entre les différents réservoirs lors de la formation du noyau terrestre. Ces échanges ont fortement influencé la signature géochimique de l'intérieur de la Terre aujourd'hui utilisée pour contraindre les processus de différenciation en terme de temps caractéristiques, de conditions P/T ou de conditions redox. Or ces échanges sont gouvernés par la taille caractéristique des écoulements du fer (gouttelettes centimétriques ou diapirs kilométriques), par le temps caractéristiques de chute (lié à la viscosité du manteau environnant) et par la morphologie de l'écoulement (qui influe sur les surfaces d'échange). Ces 3 paramètres fondamentaux sont encore, à l'heure actuelle, peu contraints.

COMSOL Multiphysics est un logiciel de modélisation multiphysique qui dispose d'une interface graphique, le COMSOL Desktop. Il propose des interfaces physiques prédéfinies pour la simulation d'applications courantes. Une suite de produits complémentaires (les modules) renforce ce noyau et élargit le champ des possibles pour la simulation d'applications plus spécifiques. Ce logiciel, basé sur la méthode des éléments finis, permet ainsi de simuler non seulement la dynamique des fluides, transfert de chaleur, mais aussi les transferts et réactions chimiques, et tout particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multi-physiques. C'est donc un outil facile à prendre en main, idéal pour les étudiants et les non-initiés à la modélisation numérique mais aussi très perfectionné et permettant une étude couplée de différentes physique dans un seul et même outil.

Dans ce projet, nous proposons de développer des modèles numériques afin de caractériser la dynamique de fragmentation d'un diapir de fer dans un océan magmatique, de caractériser le fractionnement des éléments lithophiles/sidérophiles pendant cette fragmentation et de contraindre le degré d'équilibration du manteau et du noyau manteau après la séparation Fer/silicates. Les modèles numériques seront développés à partir de COMSOL Multiphysics. Ces modèles numériques seront éventuellement accompagnés par le développement de modèles analogiques. Par ces modèles, nous caractériserons l'influence du contraste de viscosité entre le métal et la roche, de la taille initiale du diapir métallique et des coefficients de partage.

Fragmentation of iron within a magma ocean: what is the geochemical signature?

Geochemical measurements show that the Iron/Silicates separation took place during or just after the accretion of the planets of the Solar System. For the Earth, the calculated ages heavily rely on core formation models and vary between 30 and 100 Ma after the formation of the first solids in the Solar System (CAI). The segregation process could even be initiated in the first planetary embryos before the final assembly that led to the formation of the current planets. For a rapid core/mantle separation, it is necessary to invoke partial to full melting processes. During the first stages of formation of terrestrial objects, accretionary energy dissipated after impacts could be added to the energy associated with heating caused by the decay of short-lived radioactive elements (^{26}Al and ^{60}Fe). This primitive source of energy could have led to the formation of deep magma oceans and a more or less complete fusion of the primitive mantle.

Within these magma oceans, chemical equilibrium and a partial to complete segregation between the metal phase of the impactors and the molten silicate phase of the Earth's mantle occurred. Thus, lithophile elements (attracted by the rocky phase) and siderophile elements (attracted by the metallic phase) could be exchanged between the different reservoirs during the formation of the Earth's core. These exchanges have greatly influenced the geochemical signature of the interior of the present day Earth which is used to constrain the differentiation processes in terms of characteristic timescales, P/T or redox conditions. However, these exchanges are governed by the characteristic size of the iron flows (centimeter-size droplets to kilometer-size diapirs) by the characteristic sinking time (related to the viscosity of the surrounding mantle) and the morphology of the flow (which affects exchange surfaces). These three parameters are still poorly constrained even qualitatively.

COMSOL Multiphysics is a modeling software with a graphical interface, the COMSOL Desktop. It provides predefined physical interfaces for simulation of common applications. A suite of complementary products (modules) reinforces this core and expands the range of possibilities for the simulation of specific applications. This software, based on the finite element method, simulates the fluid dynamics, heat transfer, but also chemical reactions and transfers, and is specially adapted to coupled multi-physics simulation. It is an easy tool to

handle, very convenient for students and the uninitiated numerical modelers but also very refined tool enabling to couple different physical processes.

In this project, we propose to develop numerical models to characterize the dynamics of fragmentation of an iron diapir within a magma ocean, to characterize the chemical partitioning of lithophile/siderophile elements during this fragmentation and to constrain the degree of equilibration of both the mantle and the core after the iron/silicates separation. The numerical models will be developed using COMSOL Multiphysics. These numerical models will be possibly accompanied by the development of analog models. From these models, we will characterize the influence of viscosity contrast between metal and rock phases, of the initial size of the metal diapir and of partition coefficients.

Liste non-exhaustive des publications les plus récentes (*Most recent publications*):

Andrault D., **Monteux J.**, **Le Bars M.**, Samuel H. (2016). The deep Earth may not be cooling down. *Earth and Planetary Science Letters* vol.443, p.195-203.

Monteux J., Andrault D., Samuel H. (2016). On the cooling of a deep terrestrial magma ocean. *Earth and Planetary Science Letters* vol.448, p.140-149.

Boujibar A., Andrault D., Bolfan-Casanova N., Bouhifd A., **Monteux J.** (2015). Cosmochemical fractionation by collisional erosion during the Earth's accretion. vol.6, p.8295.

Le Bars, M., Cébron, D., Le Gal, P., (2015). Flows driven by libration, precession, and tides. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 47, 163–193.

Lecoanet, D., **Le Bars, M.**, Burns, K.J., Vasil, G.M., Brown, B.P., Quataert, E., and Oishi, J.S., (2015). Numerical simulations of internal wave generation by convection in water, *Phys. Rev. E* 91, 063016.

Monteux J., Amit H., Choblet G., Langlais B., Tobie G. (2015). Giant impacts, heterogeneous mantle heating and a past hemispheric dynamo on Mars. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* vol.240, p.114-124.

Sauret, A., **Le Bars, M.**, Le Gal, P., (2014). Tide-driven shear instability in planetary liquid cores. *Geophys. Res. Lett.* 41, 6078–6083.

Wacheul, J.B., **Le Bars, M.**, **Monteux, J.**, Aurnou, J.M., (2014) Laboratory experiments on the breakup of liquid metal diapirs, *Earth and Planet. Sci. Lett.* Volume 403, Pages 236-245.

Monteux, J., J., Arkani-Hamed (2014), Consequences of giant impacts in early Mars: Core merging and Martian dynamo evolution, *J. Geophys. Res. (Planets)*, Volume 119, Issue 3, pages 480–505

Monteux, J., M. Jellinek, C .J., Johnson, (2013) Dynamics of core merging after a martian mega-impact, *Icarus*, 226, Issue 1, Pages 20–32.

Cebon, D., **Le Bars, M.**, Moutou, C., Le Gal, P., (2012). Elliptical instability in terrestrial planets and moons. *Astron. Astrophys.* 539.

Monteux, J., N. Schaeffer, H. Amit, P. Cardin, (2012) Can a sinking metallic diapir generate a dynamo? *J. Geophys. Res. (Planets)*, 117, E10005, 14.