

Ecole Doctorale des Sciences Fondamentales

SUJET DE THESE

Titre de la thèse : Modélisation numérique de la différenciation chimique de la Terre Primitive

Directeur de thèse : Denis ANDRAULT

Unité de rattachement : Laboratoire Magmas et Volcans

Equipe : Pétrologie Expérimentale

Etablissement de rattachement : UCA

Courriel et téléphone : denis.andrault@uca.fr (04 73 34 67 81)

Co-encadrant éventuel : Julien MONTEUX julien.monteux@uca.fr (04 73 34 67 38)

Unité de rattachement : Laboratoire Magmas et Volcans

Etablissement de rattachement : UCA

Résumé :

Au début de l'histoire de la Terre, une différenciation chimique majeure s'est produite dans le manteau primitif au cours de son refroidissement [Boyett et Carlson, 2005]. Cette différenciation est responsable de la séparation entre les éléments compatibles qui rejoignent facilement la phase solide (par exemple Mg, Cr) et les éléments incompatibles qui ont tendance à rester dans la phase liquide (par exemple Al, Na, Fe). Ainsi, lors du refroidissement, les compositions des phases solide et liquide évoluent loin d'une composition de manteau "primitive". La différence chimique entre le silicate solide et le silicate liquide peut conduire à des différences de densité et à une séparation entre les deux phases par sédimentation des cristaux dans l'océan magmatique ou migration transcristalline du liquide. La flottabilité de la phase fondue est gouvernée par la capacité d'éléments plutôt lourds tels que le fer à intégrer la phase solide [Andrault et al., 2017]. Cette capacité peut être estimée en laboratoire dans des conditions Pression/Température du manteau profond en mesurant le coefficient de partage d'un élément entre une phase solide de silicate et la phase liquide [Nomura et al., 2011]. Bien que les coefficients de partage soient maintenant de mieux en mieux contraints pour une large gamme de P/T, la gamme de valeurs est encore débattue et donc les implications géodynamiques et géochimiques de la ségrégation primitive du manteau restent mal connues:

- **Est-ce que la présence d'un océan de magma basal dense est réaliste ? Quelle peut être son épaisseur ? Peut-il persister pendant plusieurs Ga ?**
- **Le refroidissement et la solidification de l'océan magmatique peuvent-ils induire des hétérogénéités chimiques à l'échelle du kilomètre dans le manteau terrestre ?**

La vigueur de la convection thermique ayant tendance à empêcher la sédimentation de la phase solide, il est nécessaire de modéliser la dynamique thermo-chimique globale lors de cette ségrégation. À ce jour, les modèles 1D ne sont pas en mesure de détecter les

Ecole Doctorale des Sciences Fondamentales

processus 2D ou 3D tels que la montée des panaches ou la descente des slabs denses. Dans cette thèse, nous surveillerons la concentration des éléments compatibles/incompatibles pertinents dans un océan magma en refroidissement. Le modèle calculera le contraste de densité entre les phases solide et liquide lié à l'accumulation de ces éléments. En couvrant la gamme des coefficients de partage déduits des expériences de laboratoire, le modèle testera la dynamique de cristallisation du manteau pour une flottabilité positive ou négative du matériau en fusion.

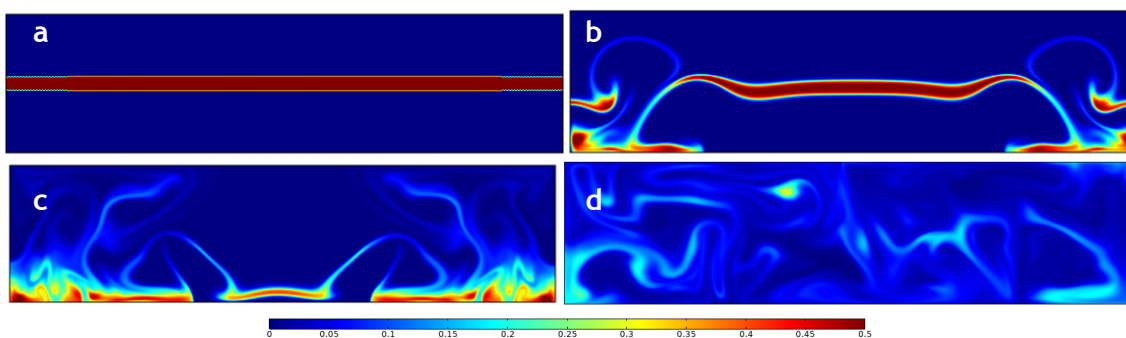


Figure 2: Résultats préliminaires de COMSOL Multiphysics : évolution de la fraction solide cristallisée (de a à d) dans une portion d'océan magmatique (1 m x 4 m). Nous suivons ici une couche fluide dense (où la fraction cristalline initiale est de 50%) à l'intérieur d'un fluide en convection chauffé par le bas.

Ces modèles permettront de déterminer les profondeurs où le matériau fondu s'accumulera éventuellement, en fonction des courbes de fusion de ce matériau (solidus et liquidus) et des paramètres géophysiques du manteau primitif. Ces modèles 2D seront développés avec COMSOL Multiphysics [par ex. *Qaddah et al., 2019*] à de petites échelles spatiales pour maintenir des propriétés géophysiques réalistes, puis extrapolées à l'échelle du manteau. Si une connaissance approfondie de la programmation informatique n'est pas requise pour démarrer ce projet, le candidat devra cependant montrer un intérêt pour modélisation numérique. Les modèles seront également comparés aux modèles récents de *Boukaré et Ricard [2017]*. Les résultats permettront de quantifier l'évolution temporelle des échanges chimiques entre les structures du manteau à densité variable et leur environnement. Ainsi, cela permettra de mieux estimer la vitesse et la profondeur auxquelles les panaches ou les slabs du manteau précoce peuvent s'élever ou couler pendant leur cristallisation, puis leur stabilité une fois le manteau complètement cristallisé. Ces structures mantelliques seront alors plus ou moins re-mélangées lors de la convection thermique du manteau, ce qui générera probablement des réservoirs stables pour plusieurs Ga. Ces réservoirs pourront plus tard être utilisés comme source de magmas de surface. Contraindre leur composition et leurs mouvements dans le manteau est crucial pour comprendre certains types de signatures géochimiques formées précocement et conservées dans le manteau terrestre pendant 1 à 2 Ga [*Touboul et al., 2012*]. Ce projet permettra également d'apporter de

Ecole Doctorale des Sciences Fondamentales

nouvelles contraintes sur la structure et la composition de la croûte primordiale. Pour les cas les plus pertinents et prometteurs, une approche 3D plus «coûteuse» numériquement sera réalisée.

Positionnement scientifique:

La dynamique de refroidissement d'un océan de magma profond est actuellement un sujet très brûlant en sciences de la Terre [par ex. *Monteux et al., 2016; Ballmer et al., 2017; Boukare et Ricard, 2017; Morison et al., 2019; Monteux et al., 2020*]. Cependant, aucune des études récentes n'a considéré le couplage mécanique entre ségrégation cristalline et convection thermique turbulente en 2D / 3D en implémentant des contraintes expérimentales réalistes et récentes (courbes de fusion, fractionnement chimique, diffusivités thermiques, paramètres thermodynamiques...). Pour la première fois, nous décrivons la dynamique d'un océan magmatique en cours de refroidissement et de cristallisation, nous suivrons son évolution chimique et mesurerons sa capacité à maintenir des réservoirs chimiquement hétérogènes à grande échelle.

Références:

Andrault D., Monteux J. et al. (2017), <i>PEPI</i> 265, p.67-81.	Monteux , J. et al., (2020) <i>G.J.Int.</i> , in press
Ballmer, M.D. et al. (2017), <i>G3</i> , 18, 2785–2806.	Morison, A. et al. (2019), <i>EPSL</i> , 516, 25-36.
Boukare, C.E. and Ricard, Y. (2017), <i>G3</i> , 18, 3385–3404.	Nomura, R. et al. (2011), <i>Nature</i> 473, 199–202.
Boyet, M. and Carlson, R.W. (2005), <i>Science</i> 309, 576–581.	Qaddah, B., Monteux , J. et al. (2019), <i>PEPI</i> , 289, 75-89.
Monteux , J. et al. (2016), <i>EPSL</i> , 448, 140–149.	Touboul, M., et al. (2012). <i>Science</i> 335, 1065–1069.