



# ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES DE LA TERRE



Sujet proposé pour un début de contrat en Septembre 2012

---

## TITRE du SUJET : Les intrusions magmatiques planétaires, théorie, modélisation, caractérisation

Directeur (trice) : **MICHAUT Chloé, MCF, michaut@ipgp.fr**

Co-encadrant(e) : **WIECZOREK Mark, DR, wieczor@ipgp.fr**

Equipe d'accueil : **IPGP- Equipe de Géophysique Spatiale et Planétaire – UMR7154**

Financement : **Contrat doctoral avec ou sans mission**

---

*Plus de renseignement voir : <http://ed109.ipgp.fr>, Rubrique : Offres\_de\_thèse  
Il est indispensable de faire acte de candidature sur le site de l'École doctorale*

---

Développement du Sujet :

### I- Introduction

Le volcanisme est un processus clé pour étudier la structure, l'évolution et l'habitabilité des planètes telluriques. Le volcanisme modifie la surface des planètes et entraîne la formation d'objets géologiques caractéristiques et observables. Il est étroitement lié à, et renseigne donc sur, la différenciation, l'évolution et l'état thermique des planètes. Le style et l'importance du volcanisme dépendent aussi de la nature et de la teneur en éléments volatils de la planète et des magmas ; éléments volatils qui sont d'une importance cruciale pour l'habitabilité d'une planète.

Le volcanisme intrusif est une source masquée mais potentiellement importante du volcanisme planétaire. Sur Terre, on considère que l'essentiel des magmas est mise en place sous forme d'intrusions en sub-surface (sills, laccolithes) et les données géologiques et géophysiques permettent d'étudier en détail ces structures (Michaut and Jaupart, 2006, 2009). Il s'agit ainsi d'une source potentiellement importante de volatils dans le bilan global d'une planète dont la connaissance est indispensable au scénario d'habitabilité à long terme d'une planète tellurique. Or, les intrusions magmatiques sont assez peu documentées pour les autres planètes telluriques. Certaines morphologies, tels des dômes à faible pente au sein des mers basaltiques lunaires et dans les plaines de l'hémisphère Nord sur Mars (Wöhler et al, 2009, Rampey et al, 2007) ou des sols fracturés surélevés au sein de cratères sur la Lune, Mars, Vénus et récemment sur Mercure (Schultz, 1976, Head et al, 2009) figurent parmi les meilleures preuves de ces intrusions extraterrestres, et pourraient donc résulter de la déformation de la surface lors d'injection de magma ne parvenant pas jusqu'à la surface. Le volume et la forme de ces éventuelles intrusions peuvent être contraints à partir de la topographie. Mais ces observations doivent être reliées à des modèles dynamiques d'intrusions magmatiques afin d'obtenir des informations pertinentes sur les propriétés physiques du magma, les taux d'injection mis en jeu et sur l'histoire géologique de ces objets en lien avec l'évolution thermique et dynamique de la planète.

Un modèle dynamique d'intrusion magmatique sous une plaque élastique a été proposé par Chloé Michaut (JGR 2011) et testé sur des laccolithes terrestres : les morphologies modélisées pour ces intrusions correspondent bien aux géométries observées. Dans ce projet nous proposons de complexifier la théorie, et de comparer les résultats de nos modèles avec les observations et données disponibles (topographiques, gravitaires) sur des intrusions terrestres, et des intrusions potentielles lunaires et martiennes.

La Lune et Mars offrent deux cadres différents d'un point de vue physique (gravité, propriétés physiques diverses de l'environnement) mais aussi d'un point de vue de leur histoire thermique et géologique qui nous permettront non seulement de tester nos modèles mais aussi d'étudier de façon comparative l'évolution et l'origine des intrusions magmatiques planétaires.

## **II- Cratères à sols fracturés**

Les cratères à sols fracturés, observés en grand nombre sur la Lune, et présents sur Mars, Vénus et Mercure, semblent enregistrer un processus endogène de soulèvement du sol qui pourrait être due à une intrusion magmatique centrée sur le cratère, ce type de cratères étant plus nombreux dans les sites à activité volcanique importante. Nous proposons ainsi de modéliser des écoulements de magma visqueux sous une croûte à topographie variable. La comparaison de la géométrie des écoulements modélisés à la géométrie des intrusions potentielles déduites de la différence de topographies entre cratères modifiés et cratères non modifiés de mêmes tailles nous donnera des contraintes sur les taux d'injection et les propriétés des magmas. Les topographies des cratères pourront être connues précisément sur la Lune grâce aux nouvelles données topographiques LOLA de la mission Lunar Reconnaissance Orbiter, lancée en 2009, et sur Mars, grâce aux données MOLA. La plupart des précédentes études sur ce type de cratères étaient en effet basées sur des images et des analyses morphométriques (Wichman and Schultz, 1995).

Nous vérifierons d'autre part la compatibilité des signaux gravitaires locaux au niveau des sites de ces cratères. Si, jusqu'ici, la résolution et la précision des bases de données des missions passées, incluant Selene/Kaguya n'était probablement pas suffisante étant donné la taille de ces cratères (~30-200 km de diamètre), la mission GRAIL, lancée en septembre 2011, générera des données (disponibles en 2012) dont la précision (<10mGal) devrait être assez fine pour donner des informations sur la structure de la croûte à une échelle de quelques dizaines à quelques centaines de km de large.

## **III- Evolution thermique des intrusions, comparaison des dômes intrusifs sur la Lune – Mars - Terre**

Le mode de refroidissement des intrusions magmatiques diffère d'un environnement planétaire à un autre. Sur la Lune où l'eau est absente, la perte de chaleur est purement conductive aux bords de l'intrusion. Par contre sur la Terre (et peut-être sur Mars ?), la circulation d'eau et l'hydrothermalisme permettent un refroidissement beaucoup plus efficace des intrusions, mais difficilement quantifiable. En conséquences, les intrusions terrestres devraient être relativement moins étendues que sur la Lune. Sur la Lune, les dômes à pente douce semblent en effet relativement plus larges que les laccolithes terrestres, ceci, même en tenant compte des différents facteurs physiques – autres que la perte de chaleur - influençant l'écoulement (différences de gravité et de viscosité des magmas).

Jusqu'ici seule la dynamique d'une intrusion isotherme à viscosité constante, a été développée. Or, au cours du temps, l'intrusion se refroidit, sa température diminue, sa viscosité augmente. Cet effet devrait jouer sur la forme de l'intrusion ainsi que sur ses dimensions finales. Nous souhaitons ainsi incorporer cet effet du au refroidissement à nos modèles et étudier son influence sur l'étendue et la forme des intrusions. Ce modèle sera testé sur la Lune et la Terre. En comparant la géométrie et la topographie de dômes lunaires, martiens et leurs analogues terrestres (laccolithes) avec les résultats des modèles, nous pourrons apporter des contraintes non seulement sur le temps de mise en place de ces intrusions et leurs propriétés physiques, mais aussi sur les

modes de refroidissement de ces intrusions dans leurs environnements planétaires respectifs: doit-on faire intervenir une part de refroidissement par circulation de fluides, sur Mars et la Terre en particulier, pour expliquer le rayon et la forme des intrusions observées ?

#### **IV- Evolution thermique de la Lune et de Mars**

Nous souhaitons enfin replacer les observations réalisées, i.e. les conséquences de la présence ou non d'intrusions magmatiques, et les résultats obtenus sur les caractéristiques physiques des magmas et les caractéristiques géologiques de leurs environnements dans le cadre plus global de l'évolution thermique et de la structure interne des planètes étudiées (la Lune et Mars en particulier). La présence d'intrusion et leurs caractéristiques physiques dépend des rapports densité du magma / densité de la croûte, qui peuvent différer de manière systématique et évoluer en fonction du temps sur les différentes planètes en raison de la composition de la croûte, des magmas et de la teneur en éléments volatils.

**Sur la Lune**, une phase de volcanisme intense a conduit à la formation des mers basaltiques puis a brutalement cessé il y a environ 3 Ga. Une question fondamentale est donc si la durée de ce volcanisme intense (3.9-3.1 Ga) a été contrôlée par la présence de magma ou par sa capacité à atteindre la surface. La contraction due au refroidissement de la Lune aurait pu engendrer des contraintes qui auraient empêché le magma d'atteindre la surface (Solomon, 1977). Les évidences d'intrusions magmatiques semblent toutes cantonnées aux mers lunaires, et les dômes déformant ces mers, ils nous offrent des informations précieuses sur les caractéristiques de la phase magmatique qui a suivi cet épisode d'intense.

**Sur Mars**, les indications d'intrusions sont rares et semblent limitées au volcanisme récent. Dans ce cas également, il nous faudra donc poursuivre la recherche d'autres indications d'intrusion pour pouvoir affirmer, puis comprendre leur occurrence dans le temps, en relation avec l'évolution magmatique de la planète rouge vue par la chimie (Baratoux et al., 2011) ou la minéralogie (Poulet et al., 2009).

#### **Bibliographie**

- Baratoux D., et al. (2011) *Nature*, 472:338-341, April 2011a. doi:10.1038/nature09903.
- Head, J. W., et al., (2009) *Earth Planet. Sci. Lett.*, 285, p. 251–262, doi:10.1016/j.epsl.2009.03.008.
- Michaut C., (2011), *J. Geophys. Res.* 116, B05205, doi:10.1029/2010JB008108.
- Michaut, C., and C. Jaupart, (2006) *Earth Planet. Sci. Lett.*, 250, 38–52.
- Michaut, C., and C. Jaupart, (2011) *Tectonophysics*, doi:10.1016/j.tecto.2009.08.019.
- Poulet F. et al, (2009), *Icarus* 201, 84 – 101. doi:10.1016/j.icarus.2008.12.042.
- Rampey N., et al (2007, *J. Geophys. Res.* 112, E06011. doi:10.1029/2006JE002750.
- Schultz, P. H., (1976), *Moon* 15, 241-273.
- Solomon, S., C. (1977), *Phys. Earth Planet. Int.* 15, p. 135-145.
- Wichman, R.W. and Schultz, P. H., (1995) *J. Geophys. Res.* 100, p. 21,201-21,218.
- Wöhler, C., R. Lena, and Geologic Lunar Research Group (2009), *Icarus*, 204, 381–398.