

Sujet proposé pour un début de contrat en octobre 2018

TITRE du SUJET : Reconstructions de la circulation dans le manteau terrestre au cours des 80 derniers millions d'années

Directeur (trice) : **Nicolas Coltice, Pr, nicolas.coltice@ens.fr**

Equipe d'accueil : **ENS- Laboratoire de Géologie de l'ENS- UMR 8538**

Financement : **Contrat doctoral avec ou sans mission d'enseignement**

Plus de renseignement voir : <http://ed560.ipgp.fr>, Rubrique : *Offres_de_thèse*
Il est indispensable de faire acte de candidature sur le site de l'Ecole doctorale

Développement du Sujet : (1 à 2 pages)

La circulation dans le manteau terrestre et la tectonique de surface sont couplées, faisant partie d'un même système dynamique (Bercovici, *Earth Planetary Science Letters* 2003). Jusqu'à présent, la théorie de la tectonique des plaques permet de décrire la cinématique de surface et l'agencement à grande échelle des déformations, tandis que les modèles géodynamiques permettent de comprendre la physique à l'œuvre en profondeur. Au cours des quinze dernières années, ces modèles numériques, plutôt cantonnés à l'étude du manteau profond jusqu'alors, ont intégré des complexités rhéologiques supplémentaires qui produisent en surface une tectonique parfois proche de celle observée sur Terre (Tackley, *Science* 2000). Ces développements font qu'aujourd'hui, il est possible de déterminer des solutions numériques compatibles avec un grand nombre d'observables géophysiques et géologiques (Coltice et al., *Earth Science Reviews* 2017), et ainsi de coupler la circulation mantellique avec ces observables reliées à la tectonique de surface (Figure 1).

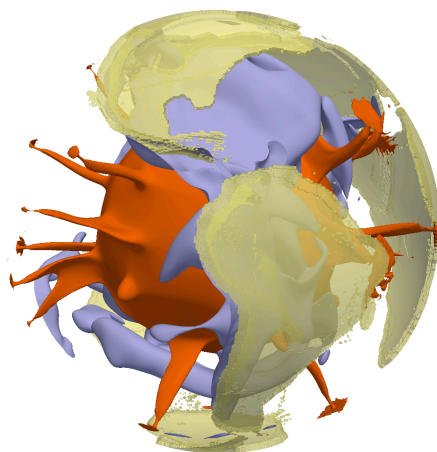


Figure 1 : Structure convective dans un modèle de convection avec une rhéologie pseudo-plastique. Des continents plus visqueux sont représentés en jaune. Un isotherme chaud en rouge permet de visualiser les panaches et un isotherme froid en bleu permet de visualiser les plaques subductées.

Les méthodes inverses permettraient de tirer le maximum d'informations des données et de la physique de ces modèles. Un problème majeur est de proposer grâce à ce genre d'approche des solutions pour l'évolution de la circulation dans le manteau au cours du temps, cohérentes avec les reconstructions de la tectonique des plaques (Matthews, *Global and Planetary Change* 2016). Il existe des propositions dans la littérature, mais les résultats obtenus ont été produits avec des modèles géodynamiques incapables de générer une tectonique de surface proche de la Terre de manière auto-cohérente. C'est-à-dire que la physique n'est pas adaptée au problème posé. D'autre part, ces modèles forcent les mouvements de la surface, introduisant des forces qui

n'existent pas dans la nature, et ignorant les incertitudes sur la cinématique des reconstructions tectoniques (Lowman, *Tectonophysics* 2011).

L'assimilation de données est une approche de choix pour palier à ces verrous et réaliser une avancée. Cette méthode couramment utilisée en météorologie, en océanographie physique, en climatologie (Kalnay, 1996) en géomagnétisme (Fournier, *Geophysical Journal International* 2011), pose un problème inverse visant à corriger la trajectoire temporelle d'un système dynamique de manière à le faire correspondre aux observations de la manière optimale (c'est-à-dire en considérant les confiances respectives que l'on a dans le modèle et dans les observations). Marie Bocher a développé au cours de sa thèse terminée en 2016 une méthode d'assimilation de données séquentielle qui capitalise sur la capacité des modèles à générer une tectonique de surface et permet de prendre en compte les incertitudes des reconstructions tectoniques (Bocher et al., *Geophysical Journal International* 2016 ; Bocher et al., *Nonlinear Processes in Geophysics* 2018). Des tests concluants ont été réalisés sur des modèles 2D et dans des situations contrôlées (Figure 2). L'objectif de ce projet de doctorat est d'étendre la méthode au problème 3D et de l'appliquer à la Terre. C'est une étape fondamentale qui permettra d'améliorer les reconstructions tectoniques et de proposer une imagerie nouvelle de l'intérieur de la Terre, indépendante des données sismiques. Ainsi, il sera possible d'interpréter les modèles tomographiques, mais aussi, entre autres, de caractériser les forces agissant sur la lithosphère, les mouvements verticaux des continents ou les variations du niveau marin.

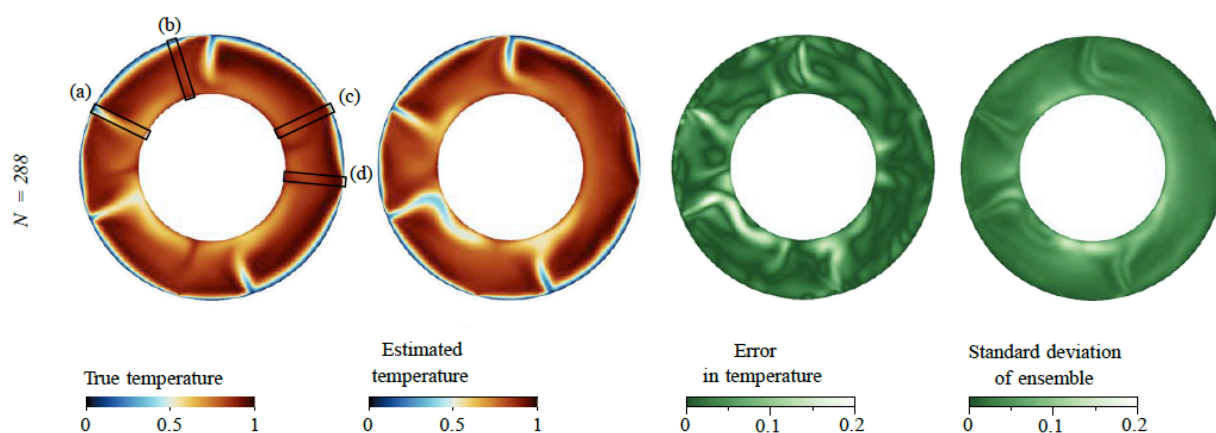


Figure 2 : Résultat d'une expérience contrôlée d'assimilation de données séquentielles pour un modèle de convection 2D. Les données utilisées sont la vitesse de surface et le flux de chaleur (proxy pour l'âge des fonds marins). À gauche est représentée le champ de température à déterminer, à côté de l'estimation du champ de température le plus probable après les 150 Ma d'assimilation. L'erreur entre les deux solutions est représentée à côté de l'écart type local de l'ensemble des modèles permettant d'estimer la statistique. D'après Bocher et al. (2018).

Dans un premier temps, la doctorante évaluera la méthode d'assimilation de données dans des modèles 3D. Le code d'assimilation de données tel qu'il a été conçu permet une versatilité sur le modèle utilisé qui rend ce travail réalisable sans changer le cœur du programme. Nous profiterons de la collaboration avec Marie Bocher, actuellement à l'E.T.H. Zurich, pour passer cette étape. L'environnement parisien est idéal pour ces questions d'assimilation de données, puisque le Laboratoire de Météorologie Dynamique est pionnier sur ces méthodes (O. Talagrand à l'ENS), et des applications en géosciences sont développées à l'ENS (R. Jolivet) et à l'IPGP (A. Fournier, J. Aubert). Le calculateur du projet ERC (640 cœurs) et le centre de calcul de PSL seront utilisés pour réaliser les tests en situations contrôlées et l'exploration des paramètres de l'assimilation.

Dans un second temps, l'application aux données terrestres sera considérée. Ce travail sera réalisé avec le groupe EarthByte de Sydney et Mike Tetley de l'équipe du projet ERC. L'équipe internationale dans laquelle la doctorante sera intégrée estimera les incertitudes sur les reconstructions jusqu'à 80 Ma. Au delà de cette période, il est beaucoup plus difficile de contraindre les reconstructions parce que notamment il n'existe plus de trace de point chaud dans le Pacifique (Louisville et Hawaï). D'autre part, la cinématique des plaques entre 60 et 40 Ma est déjà complexe (début de la collision Inde-Asie, ouverture Amérique-Groenland-Eurasie, dorsales Izanagi-Pacifique en contact avec la fosse de subduction) et a été révisée régulièrement (Matthews, *Global and Planetary Change* 2016). Par ailleurs, la puissance de calcul nécessaire limitera la durée de l'assimilation de données à 50-80 Ma maximum. La doctorante profitera des travaux réalisés en amont par l'équipe française sur les modèles de convection pour choisir les paramètres physiques adéquats (Mallard et al., *Nature* 2016 ; Coltice et Shephard, *Geophysical Journal International* 2018). Elle réalisera donc la première assimilation de données avec un modèle dont la physique est cohérente avec la tectonique, et

prenant en compte les incertitudes sur les reconstructions. Elle obtiendra ainsi une circulation dans le manteau et une tectonique *a posteriori* qui pourra, par sa confrontation aux reconstructions tectoniques existantes, les améliorer. Cet écoulement sera ensuite utilisé pour interpréter les signaux sismologiques, étudier l'évolution de la topographie dynamique, du flux de chaleur à la base du manteau, ou encore des contraintes dans la lithosphère par exemple.

Réaliser cette thèse apportera à la doctorante des compétences en modélisation géodynamique ainsi qu'en assimilation de données. Marie Bocher, par exemple, a profité de cette double compétence pour poursuivre son parcours dans un autre domaine des géosciences où elle apporte son expertise sur les filtres de Kalman d'ensemble. La doctorante montera en compétence dans les domaines liés aux reconstructions tectoniques (géophysique marine, tectonique, paléomagnétisme). Elle fera l'expérience d'un projet à long terme au sein d'une équipe multidisciplinaire et internationale (Paris, Zurich et Sydney). Elle aura l'occasion de présenter ses travaux dans des conférences à l'étranger. Elle pourra aussi profiter du réseau de femmes scientifiques qui s'est agrégé autour du projet AUGURY, dont certaines sont toujours dans la recherche académique, et d'autres dans la diffusion des savoirs et le développement informatique.