

MACHEREL Emilie (2023): Exploring three-dimensional geodynamic process : insights from numerical modelling on diapirism and mountain stability

Abstract

Lithospheric stresses play a crucial role in geological processes at various spatial and temporal scales. However, the distribution and magnitudes of these stresses are poorly constrained in diverse geodynamic settings.

The objective of this thesis is to enhance our understanding of stress distribution and magnitudes surrounding two distinct geological features and their implications. The first part of the thesis focuses on diapirism, a process where a less dense body rises into a denser material, playing a major role in the Earth's heat and mass transfer. Quantifying the upward velocity of buoyant bodies is essential, as it determines the significance of diapirism in different geological contexts. To achieve this, we developed a 3-D numerical algorithm in spherical coordinates using the Julia programming language. The algorithm solves the Stokes equations under the influence of gravity, with rheology incorporating a combination of linear and power-law viscous flow laws. Employing finite difference and pseudo-transient methods, the algorithm calculates instantaneous stress and velocity fields. In the first study, the model consists of a buoyant sphere ascending in a denser medium under strike-slip shearing. Results indicate that the diapir's ascent velocity depends on two stress ratios: (a) regional stress to characteristic stress, and (b) buoyancy stress to characteristic stress. Regional stress arises from far-field deformation, while buoyancy stress originates from the diapir itself as it attempts to move upwards. The characteristic stress is a material property, marking the stress level at which deformation behavior transitions from diffusion creep (linear flow law) to dislocation creep (power-law flow law). Indeed the stress ratios generate stress weakening which significantly impacts the rising velocity of the diapir. Furthermore, we compared our results with existing analytical estimates, demonstrating their accuracy and applicability across a wide range of geodynamic settings. Additionally, we were able to improve these estimates by introducing a shape factor and an extra term accounting for the impact of the regional stresses.

The second part of the thesis focuses on continental plateaus. It is well-established that stress states around significant topography cannot be lithostatic to maintain their geometry over extended periods of time. Depth-averaged stress and strength estimations exist, but the spatial distribution of these quantities throughout the lithosphere remains unclear. The goal of the second part of the thesis is to provide constraints on their spatial distribution. To accomplish this, we employed the same numerical algorithm as in the first part of the thesis, with a predefined geometry of a continental plateau. We calculated stress and velocity fields generated only by gravity and tested the impact of various parameters and characteristics on these fields. Results reveal that curvature has a minor impact on the stress field, while the corner region significantly influences stress distribution, particularly shear stresses. Varying viscosities of the crust and lithospheric mantle strongly affect stress distribution and plateau spreading velocities. Our results show that lithospheric strength is mainly located in the crust rather than the lithospheric mantle. Also, our findings indicate that stress cannot serve as a proxy for strength. Additionally, we derive simple analytical estimates for horizontal deviatoric stress and spreading velocities of a continental plateau.

Résumé

Les contraintes lithosphériques jouent un rôle crucial dans les processus géologiques à différentes échelles spatiales et temporelles. Cependant, la distribution et l'amplitude de ces contraintes sont mal connues dans divers contextes géodynamiques. L'objectif de cette thèse est ainsi d'améliorer notre compréhension des contraintes et de leur implication au sein de deux caractéristiques géologiques distinctes.

La première partie de cette thèse est dédiée à l'étude du diapirisme : ce processus consiste en l'élévation d'un corps moins dense au sein d'un milieu plus dense. Il joue un rôle majeur quant au transfert de chaleur et de masse dans la Terre. C'est pourquoi quantifier la vitesse d'ascension de ces corps est essentiel. Une telle chose permettrait de déterminer l'importance du diapirisme dans divers contextes géologiques. Pour ce faire, nous avons développé un algorithme numérique 3D en coordonnées sphériques ; nous y avons utilisé le langage de programmation Julia. Cet algorithme résout les équations de Stokes sous l'influence de la gravité, avec une rhéologie combinant des lois d'écoulement visqueux linéaire et non-linéaire. En utilisant les méthodes des différences finies et pseudotransiente, il calcule les champs de contraintes et de vitesses instantanées. L'étude du diapirisme est menée au moyen d'une modélisation numérique. Ce modèle consiste en une sphère s'élevant dans un milieu plus dense, le tout dans une zone de cisaillement. Les résultats indiquent que la vitesse d'ascension du diapir dépend de deux ratios de contraintes : (a) la contrainte régionale par rapport à une contrainte caractéristique, et (b) la contrainte de flottabilité par rapport à la même contrainte caractéristique. La contrainte régionale provient de la déformation à grande échelle, tandis que la contrainte de flottabilité prend son origine du diapir lui-même alors qu'il tente de s'élever. La contrainte caractéristique est une propriété du matériau, marquant le niveau de contrainte auquel la déformation passe de diffusion (loi d'écoulement linéaire) à dislocation (loi d'écoulement non-linéaire). En effet, les ratios de contraintes génèrent une modification de la viscosité, ce qui impacte grandement la vitesse de remontée du diapir. De plus, nous avons comparé nos résultats avec des estimations analytiques existantes, démontrant leur précision et leur applicabilité dans beaucoup de contextes géodynamiques. De plus, nous avons comparé nos résultats avec des estimations analytiques existantes, ce qui nous a permis de les améliorer en y ajoutant un terme prenant en compte l'effet des contraintes régionales. Les estimations analytiques démontrent une grande précision et une bonne applicabilité dans beaucoup de contextes géodynamiques.

La deuxième partie de la thèse se concentre sur les plateaux continentaux. Il est bien établi que les états de contrainte autour d'une topographie significative ne peuvent pas être lithostatiques pour maintenir la géométrie sur de longues périodes. Des estimations de contraintes et de résistance moyennées sur la profondeur existent, mais la distribution spatiale de ces quantités à travers la lithosphère demeure floue. L'objectif de la deuxième partie de la thèse est, ainsi, de mieux définir leur distribution spatiale. Pour ce faire, nous avons utilisé le même algorithme numérique que dans la première partie de la thèse, avec une géométrie prédéfinie de plateau continental. Nous avons alors calculé les champs de contraintes et de vitesses générés uniquement par la gravité et testé l'impact de divers paramètres et caractéristiques sur ces champs. Les résultats révèlent que la courbure a un impact mineur sur le champ des contraintes, tandis que les variations latérales de l'épaisseur de la croûte influent significativement la distribution des contraintes, en particulier les contraintes de cisaillement. La variation des viscosités de la croûte et du manteau lithosphérique montre une forte influence sur la distribution des contraintes et des vitesses de propagation du plateau. Nos résultats

montrent également que la résistance lithosphérique se trouve principalement dans la croûte plutôt que dans le manteau lithosphérique. De plus, nos conclusions indiquent que les contraintes ne peuvent pas être utilisées comme indicateur de la résistance. Finalement, nous avons développé des estimations analytiques simples afin d'évaluer les contraintes horizontales ainsi que la vitesse d'écoulement d'un plateau continental.