

Adaptive multiresolution methods for problems of computational geodynamics

A dissertation submitted to
ETH ZÜRICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by

Yury Mishin

Dipl. Phys. Chem. & Dipl. Comp. Sci.
Lomonosov Moscow State University

born
December 17, 1980

citizen of
Moscow, Russian Federation

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Jean-Pierre Burg	ETH Zürich	Examiner
Prof. Dr. Taras Gerya	ETH Zürich	Co-examiner
Prof. Dr. Paul Tackley	ETH Zürich	Co-examiner
Prof. Dr. Oleg Vasilyev	CU Boulder	Co-examiner

Summary

Two related research projects were carried out in the context of this doctoral thesis. (1) The first one was devoted to the numerical study of double subduction geodynamic process. (2) The second one consisted of the development, implementation and evaluation of a new efficient numerical technique for the Stokes flow problems arising in geodynamics.

(1) Double subduction is a complex geodynamic process in which two plates following each other are synchronously subducted in the same direction. Such an episode is, in particular, involved into the history of the Himalayan collision zone. Our knowledge about double subduction is limited to conceptual schemes and it remains enigmatic in terms of physical factors controlling its initiation, duration and dynamics. In the context of this thesis, the systematic numerical study of double subduction systems was performed using a coupled petrological-thermomechanical approach. The results of the study show that: (a) Subduction rates at two zones running in parallel differ and vary in time even when the total convergence rate remains constant. (b) Double subduction systems involve several processes unknown in simple subduction systems. (c) The dynamics of double subduction is characterized by different modes of interaction of two subducting slabs with the 660 km discontinuity.

(2) The new adaptive multiresolution method for the Stokes flow problems was developed. The method is based on particle-in-cell (PIC) approach — the Stokes system is solved on a static Eulerian finite element grid and material properties are carried by Lagrangian particles. The Eulerian grid is automatically adapted in space using the original wavelet-based adaptation algorithm. The adaptation is supported for bilinear (Q_1P_0 , Q_1Q_1) and biquadratic (Q_2P_{-1}) mixed finite element grids. The method was applied to linear (sinking block and Rayleigh-Taylor instability benchmarks) and to non-linear (brittle extension / compression benchmark) problems, and applicability of implemented elements in different conditions was evaluated. The proposed adaptive multiresolution method provides very significant performance gain compared to the non-adaptive approach, while results obtained in adaptive and non-adaptive simulations show very good agreement.

Résumé

Cette thèse rassemble deux projets de recherche complémentaires.

- (1) L'analyse numérique du processus de subduction double ainsi que
- (2) le développement, l'implémentation et l'évaluation d'une nouvelle approche numérique pour résoudre le problème de Stokes dans le contexte géodynamique.

(1) La subduction double est un processus géodynamique complexe lors duquel deux plaques lithosphériques voisines se suivent et subduisent dans la même direction. Ce phénomène eut par exemple lieu dans le contexte de la collision himalayenne. La connaissance du phénomène se limite à des modèles conceptuels et les facteurs physiques contrôlant l'initiation, la durée et la dynamique sont mal connus. L'approche numérique utilisée dans le cadre de cette thèse pour l'étude du phénomène de double subduction se base sur le couplage pétro-thermo-mécanique. L'étude montre que : (a) les vitesses de subduction relatives à chacune des deux zones varient temporellement et d'une zone à l'autre même dans le cas où la vitesse globale de convergence demeure constante, (b) certains processus sont spécifiques à la subduction double et (c) la dynamique de la subduction double est caractérisée par les multiples modes d'interaction des deux plaques avec la discontinuité des 660 km discontinuity.

(2) Une méthode de multirésolution adaptative a été développée pour la résolution du problème de Stokes. Cette méthode est basée sur l'approche particle-in-cell (PIC) — le système de Stokes est résolu sur un maillage éléments finis eulérien, et les propriétés des matériaux sont portées par les particules lagrangiennes. La grille eulérienne est automatiquement adaptée spatialement par un algorithme utilisant les ondelettes. Cette adaptation est permise pour les grilles d'éléments bilinéaires (Q_1P_0 , Q_1Q_1) et biquadratiques (Q_2P_{-1}). La méthode a été appliquée dans le cadre de problèmes linéaires (solide s'enfonçant dans un fluide visqueux et instabilité de Rayleigh-Taylor) et non-linéaires (déformation cassante en extension / compression). La mise en œuvre des différents problèmes a été évaluée avec les différents types d'éléments implémentés. La méthode de multirésolution adaptative proposée donne des

résultats semblables à ceux obtenus par une approche non adaptative, mais apporte un gain significatif en termes de performances.