



Doctoral Thesis

## Continental surface evolution in response to deep lithospheric processes

**Author(s):**

Duretz, Thibault

**Publication Date:**

2011

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-7362627> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH Nr. 20150

**CONTINENTAL SURFACE EVOLUTION IN RESPONSE TO DEEP  
LITHOSPHERIC PROCESSES**

ABHANDLUNG

zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER WISSENSCHAFTEN

der

ETH ZÜRICH

vorgelegt von

THIBAUT DURETZ

Dipl.-Geowissenschaft., Université Louis Pasteur at Strasbourg

geboren am 9. Mai 1985

aus Frankreich

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. Paul J. Tackley	ETH Zürich	Referent
Prof. Dr. Taras V. Gerya	ETH Zürich	Korreferent
Prof. Dr. Wim Spakman	University of Utrecht, Utrecht	Korreferent
Dr. Jeroen van Hunen	University of Durham, Durham	Korreferent

2011

## Abstract

This thesis is a compilation of numerical modelling studies related to the field of geodynamics and subduction dynamics. The different studies which comprise this thesis are essentially focussed on the topic of slab detachment in collision zones. The multiple themes that were addressed during this work concern the evolution of subduction-collision zones subjected to slab detachment, both in terms of geodynamic and topographic evolution, the quantification of slab detachment depth and duration, the deformation modes and mechanisms that lead to slab detachment, as well as the dynamic consequences of this geodynamic process such as the variations of surface uplift, exhumation of high-pressure rocks and orogenic extension.

The results presented in this thesis were obtained using a two-dimensional (2D) thermo-mechanical code based on the Finite-difference/Marker-In-Cell (FD-MIC) method. In the first chapter, a study of the numerical accuracy of the FD-MIC methodology is presented. The order of accuracy of the FD-MIC scheme was investigated by means of a grid convergence study. In different test cases, large and sharp variations of viscosity (being a typical feature in geodynamic models) were employed. Simulations that combine mantle flow and topographic evolution require a free surface or an approximate free surface. However, this configuration may result in unphysical oscillations. A stabilisation algorithm that suppresses the instability was therefore derived and tested. The subsequent chapters applied the FD-MIC scheme to study the various aspects of slab detachment.

The evolution of subduction-collision zones subjected to spontaneous slab detachment was investigated by means of two-dimensional (2D) thermo-mechanical modelling. The initial age of the oceanic slab was shown to control the depth of slab detachment which can vary between 40 and 400 km. Since slab detachment can occur over a wide depth range, variations in the tectonic styles of collision can be expected. The results showed that the topographic evolution of these collision zones witness the deep dynamics of subduction. Moreover, a strong feedback between the depth of slab detachment and the rates of surface uplift was highlighted.

In order to better understand the modes of deformation that lead to detachment, a compilation of slab detachment simulations was analysed. The results showed that slab deformation is accommodated by both pure and simple viscous shear deformation. Additionally, our results indicate that the duration of slab detachment events is fast with regard to the geological timescale ( $< 4$  Ma). A comparison between 2D thermo-mechanical experi-

ments and a one-dimensional (1D) necking analytical solution highlighted the importance of ductile necking during slab detachment. The influence of shear heating was investigated in 1D which led to the conclusion that shear heating can accelerate (up to 5 times) the detachment process.

The slab detachment concept implies a significant decrease of the slab pull force, which triggers a dynamic lithospheric response. Part of this response is the potential reactivation of the subduction zone into a normal sense shear zone. This extensional regime, termed *eduction*, was numerically studied and its implications were described into detail. Moreover, scaling laws predicting plate velocities after slab detachment were derived. The *eduction* mechanism can partially explain the coherent exhumation of deeply buried crust. The potential applicability of this model to the Western Gneiss Region (Norway) is discussed.

In order to tackle the importance of the crustal rheological structure on slab detachment, a numerical study was carried out. The results showed that collisions involving a strong crust provide a strong coupling at the Moho. This mechanical coupling promotes deep continental subduction and an eventual slab detachment. Conversely, weak coupling at the Moho is the consequence of a weak crust. Such configuration led to delamination and slab retreat, inhibiting slab detachment. Introducing a layered crust (upper/lower crust) resulted in a collision zones that were sequentially affected by delamination and slab detachment. Each of these modes of continental collision were characterised by their detailed topographic evolution and uplift history.

Lastly, a description of some recent three-dimensional (3D) numerical simulations is provided. Although 3D dynamics involves additional complexities in the trench parallel direction, the overall geodynamic and topographic evolution of these preliminary models is consistent with the 2D simulations of slab detachment presented in this thesis.

## Résumé

Ce mémoire synthétise une succession d'études numériques en géodynamique aillant pour but commun une étude détaillée des processus de subduction. Les différents chapitres qui constituent cette thèse portent essentiellement sur le sujet des détachements de panneaux plongeants (DPP) dans les zones de collision. Les multiples thématiques abordées dans cette étude concernent l'évolution géodynamique et topographique des zones de collision sujettes aux DPP, la quantification de la durée et la profondeurs auxquelles surviennent les DPP, ainsi que les conséquences dynamiques des DPP telles que les variations des taux d'élévation de la surface, l'exhumation des roches de haute pression, et l'extension orogénique.

La plupart des résultats présentés dans cette thèse ont été obtenus à l'aide de la méthode des Différences Finies/ Marqueurs-En-Cellulle (DF-MEC). Le premier chapitre de cette thèse présente les résultats de l'étude numérique du schéma DF-MEC. L'erreur de troncation de la méthode DF-MEC a été calculée à différentes résolutions de maille permettant ainsi d'évaluer la précision de ce schéma numérique. Les différents cas considérés lors de cette étude, impliquant des variations de viscosité de plusieurs ordres de grandeur, sont typiques des cas rencontrés en modélisation géodynamique. Les simulations numériques couplant les écoulements du manteau avec l'évolution de la topographie nécessitent une surface libre (ou approximation). Néanmoins, ce type de calcul peut générer des oscillations non physiques. Pour parer à ce phénomène, un algorithme de stabilisation a été développé et testé. Les chapitres suivants présentent des applications du schéma DF-MEC et sont axés sur l'étude des différents aspects liés aux DPP.

L'évolution des zones de subduction-collision a été étudiée à l'aide de simulations thermo-mécaniques à deux dimensions (2D). Les profondeurs auxquelles les DPP peuvent survenir varient entre 40 et 400 km. Cependant, ces profondeurs sont fortement influencées par l'âge thermique initial du panneau. Ces différentes profondeurs peuvent donc résulter en une variété de styles tectoniques collisionnels mis en évidence par la modélisation. L'analyse de l'évolution topographique de ces simulations a permis d'identifier la contribution des processus profonds liés à la subduction. Un fort couplage entre la profondeur des DPP et les taux d'élévation de la surface a été mis en évidence.

Une compilation de résultats numériques de DPP a été réalisée afin d'étudier le comportement mécanique des DPP. L'analyse des déformations du panneau montre que les DPP sont la conséquence d'une combinaison de cisaillement pur et simple dans le champ rhéologique

visqueux. Subsidiativement, les résultats obtenus indiquent que la durée des DPP est relativement rapide à l'échelle des processus géodynamiques ( $< 4$  Ma). La comparaison entre les résultats numériques 2D et une solution analytique d'amincissement de plaque a permis de mettre en évidence l'importance du boudinage durant les DPP. En complément, une analyse 1D révèle que l'influence du chauffage par cisaillement permet d'accélérer les DPP, au maximum, par un facteur 5.

La conséquence directe des DPP est la diminution, au moins partielle, de la force d'entraînement du panneau plongeant. Le changement du bilan des forces dans la zone de collision peut alors générer une réponse dynamique de la lithosphère. La réactivation potentielle de la faille de subduction dans un régime extensif fait partie de ces conséquences. Les implications de ce contexte tectonique transitoire, appelé éduction, ont été étudiées au moyen de simulations numériques. Subsidiativement, une loi d'échelle permettant de prédire la vitesse de la plaque subduite après un DPP a été établie. L'application de ces simulations numériques à l'évolution tectonique de la Région des Gneiss de l'Ouest (Norvège) y est discutée.

La structure rhéologique de la croûte influence fortement les styles de collision tectonique, une étude numérique a été menée afin d'évaluer son influence sur les DPP. Les croûtes résistantes permettent un couplage mécanique important au Moho, ce couplage promeut l'enfouissement de la croûte continentale dans les zones de subduction ainsi que les DPP. A l'inverse, les croûtes molles favorisent la délamination au Moho ainsi que le recul du panneau plongeant, empêchant le développement des DPP. L'introduction d'une croûte lithée (croûte supérieure/inférieure) permet des développements orogéniques alliant délamination et DPP.

En guise de conclusion, les résultats de simulations tridimensionnelles (3D) de DPP sont discutés. Bien que ces simulations impliquent la contributions de processus tectoniques dans l'axe de la fosse, leur évolution géodynamique et topographique sont en bonne concordance avec les résultats 2D présentés dans cette thèse.