



Doctoral Thesis

Generalization of a 3-dimensional fault interaction model including tectonics, fluids, and stress transfer

Author(s):

Fitzenz, Delphine Danielle

Publication Date:

2002

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004453130> →

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. 14609

**Generalization of a 3-dimensional fault interaction model
including tectonics, fluids, and stress transfer**

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY (ETH)
ZÜRICH

for the degree of
DOCTOR OF NATURAL SCIENCE

presented by
DELPHINE DANIELLE FITZENZ

Engineer Geophysicist
Institut de Physique du Globe (EPG), Strasbourg

born 6. June 1976

French citizen

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Simon Löw, examiner

Dr. Stephen A. Miller, co-examiner

Prof. Dr. Domenico Giardini, co-examiner

Dr. Jacques Deverchère, co-examiner.

2002

Abstract-Résumé

Abstract

A 3-dimensional fault interaction model was developed that incorporates the dominant aspects of the earthquake process. This includes large-scale plate-motion loading, small-scale hydraulics and fluid flow in fault zones, and elastic stress transfer from slip on one fault to all other faults in the system. The basis for modeling brittle faulting is the analytical solution for the displacement field resulting from slip on a dislocation plane of any orientation embedded in a 3-dimensional elastic half-space. Fault hydraulics are approximated by large co-seismic changes in fault zone permeability. A study of stress transfer investigated the changes in Coulomb failure stress (ΔCFS) on optimally oriented vertical faults following the Izmit (M_w 7.4, 1999, Turkey) earthquake. This study demonstrated the significant limitations to the ΔCFS approach, particularly with respect to the regional stress tensor and of pore pressure state in the medium. The ΔCFS approach is incorporated into a forward model that integrates large-scale tectonic loading (stress changes and pore pressure changes through poroelasticity), small-scale co-seismic hydraulic property evolution, and interseismic compaction processes. This allows monitoring the time evolution of the stress and pore pressure state on a fault system, model seismicity, and the consequent coseismic elastic surface deformation. The regional stress in the model area can be calculated (at any depth at any location) as a result of tectonic loading and slip along faults.

A 3-dimensional forward model of interacting faults (Fitzenz and Miller, 2001) generalizes the model of Miller et al. (1996,1999) to a fully three-dimensional model where faults of any strike and geometry interact through an elastic matrix. Simulation results are presented of the long-term evolution (≈ 9300 years) of a generic case of a blind, dipping fault and a subvertical strike-slip fault in a transpressional tectonic environment. These results show the development of pore pressure compartments, seismicity statistics that conform with theoretical and observed results, and realistic rupture propagation patterns that include changes in the rake angle. The important influence of fault zone fluids on the triggering of earthquakes from one fault to the other, via poroelastic effects is also investigated.

Constraints on fault zone hydraulics were investigated, and a fault compaction model is developed and implemented into the forward model. The modeled fault zone is derived from field and borehole observations of active crustal faults. It is shown that compaction of a ductile fault zone is a viable (and likely) mechanism for overpressuring faults, particularly if in-plane fault hydraulics are considered. We show and discuss how the large pore pressure drops following a seismic event shown in a 1-dimensional model (Sleep and Blanpied, 1992) do not occur when co- and post-seismic hydraulics of the 2nd and 3rd

dimension are considered.

The model developments discussed in this thesis are combined into a regional model of a transpressional San Andreas Fault (SAF) in Central California. The main aspects are plate motion loading, shear creep and ductile compaction, in-plane interseismic fluid diffusion, and out of plane leakage. Maps of tectonic regimes and Coulomb failure stress provide constraints on the boundary conditions (e.g., tectonic loading). We find that overpressured compartments on model faults through ductile compaction are a necessary consequence of the tectonic loading, specifically where high normal stress acts on long straight fault segments. It is shown that a transpressive tectonic regime develops South-West of the model Big Bend as a result of the loading boundary conditions, consistent with observations. Stress transfer from fault seismicity is shown to induce significant perturbations in the local stress tensor. Maps of maximum shear stress emphasize the need for future model developments to dynamically generate new fault planes that respond to the evolving stress field. The results of this study form the foundation for developing time-forward mechanistic assessment of seismic hazard for large-scale potentially destructive fault systems.

Résumé

Un modèle tridimensionnel incorporant les aspects dominants de la mécanique des tremblements de terre a été développé. Il prend en compte le chargement tectonique à grande échelle, les propriétés hydrauliques et les fluides à petite échelle dans les zones de faille, et les transferts de contraintes élastiques sur toutes les failles du système dus au glissement sur l'une des failles. La modélisation de la rupture fragile s'appuie sur les solutions analytiques décrivant le champ de déplacement résultant du glissement sur un plan de dislocation de géométrie quelconque dans un demi-espace élastique. L'hydraulique des failles est décrite sous la forme de grandes variations de perméabilité cosismiques. Une première étude s'est intéressée aux effets du séisme d'Izmit (M_w 7.4, 1999, Turquie) sur la proximité du seuil de rupture autour de la faille principale. Les variations de contrainte de rupture (Coulomb failure stress, *CFS*) ont été calculées sur des plans verticaux orientés optimalement pour la rupture. Cette étude a mis en évidence les limites de cette méthode, liées en particulier à la nécessité d'avoir une connaissance détaillée du tenseur de contraintes en trois dimensions et de la pression fluide dans le milieu. Cette approche semi-directe est la base des modèles directs d'interaction entre failles développés dans cette thèse. Les autres processus pris en compte sont le chargement tectonique, les variations cosismiques des propriétés hydrauliques de la zone de faille, et la compaction intersismique. Les contraintes, la pression fluide, la sismicité sont enregistrées, et le tenseur de contrainte régional peut être calculé en réponse à la tectonique et au glissement sur les failles du modèle.

Un modèle 3-D direct d'interaction entre failles (Fitzenz and Miller, 2001) généralise le modèle de Miller et al. (1996,1999). Les résultats des simulations montrent l'évolution dans le temps (≈ 9300 ans) d'un système comprenant une faille enfouie inclinée et une faille cisillante subverticale dans un environnement transpressif. Des compartiments de pression fluide se développent sur les failles, les statistiques de la sismicité sont en accord avec les observations et la théorie, et la propagation des ruptures est réaliste. L'influence des fluides dans le déclenchement de séismes d'une faille à l'autre par effet poroélastique est également étudiée.

Nous avons étudié comment contraindre l'hydraulique des zones de faille, et nous avons développé un modèle de compaction que nous avons intégré dans le modèle direct. La représentation des zones de faille est basée sur des observations de failles actives (terrain et forage). La compaction de zones de faille ductiles se révèle être un mécanisme viable (et vraisemblable) de surpressurisation des failles, en particulier quand les circulations de fluide dans le plan des failles sont inclus. Nous montrons et discutons comment les chutes de pression qui se produisent après une rupture dans le modèle 1-D de Sleep et Blanpied (1992) ne se produisent pas dans le modèle 3-D.

Les développements du modèle discutés dans cette thèse sont combinés dans un modèle régional, transpressif, de la faille San Andreas en Californie centrale. Les aspects principaux en sont les mouvements de plaques, le glissement aismique (shear creep), la compaction visqueuse, la diffusion intersismique dans le plan de faille, et la fuite de fluide hors de la zone de faille. Des cartes des régimes tectoniques et de seuils de rupture permettent de contraindre les conditions aux limites (chargement tectonique). Des compartiments surpressurisés se développent en réponse à la compaction, en particulier quand le chargement tectonique induit des grandes contraintes normales. Un régime transpressif

se développe dans le modèle au sud-ouest de la courbure dans la limite de plaque, en accord avec les observations. Les transferts de contrainte dus à l'activité sismique des failles modélisées provoquent des perturbations significatives dans le tenseur de contrainte local. Des cartes de contrainte cisailante maximale mettent en relief la nécessité d'intégrer la génération dynamique de nouvelles failles en réponse aux variations du champ de contrainte dans les prochains modèles. Les résultats de cette étude forment les fondations pour une évaluation du risque sismique basée sur la mécanique des tremblements de terre, pour les systèmes de failles potentiellement destructeurs.