

DISS. ETH NO. 26949

**Physical controls on dynamics of spontaneously
retreating subduction zones**

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

JESSICA MUNCH

M. Sc., Université Lyon 1 - École Normale Supérieure de Lyon

born on 30.10.1993

citizen of
France

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Taras Gerya

Prof. Dr. Paul Tackley

Prof. Dr. Nicolas Coltice



21th May 2020

Abstract

English

Retreating subduction zones are geological features present all over the world, such as Scotia region, between South America and Antarctica or, according to some studies, in the Caribbean. Retreating subduction zones consist in a plate having a downward motion towards the Earth's mantle, which retreats due to slab pull. They are expressed by curved trenches at the surface.

Subduction zones are at the interface between our planet's surface and its mantle and deep structures. What happens there is influenced by deep mechanisms and the properties of the mantle, but also by what is happening at the surface, such as loading and unloading of the trench, the subducting and overriding plate, or the physical properties of the subducted material. In this work, I am interested in understanding how these systems move around, what influences their course both in depth and at the surface.

To address this research question, I need to take into account many characteristics, from the composition and mechanical evolution of the Earth's layers, to the thermal structure of our planet. I am interested in the retreat dynamics as well as the topography evolution. This is a 3D problem in essence. I performed 3D thermo-mechanical simulations of subduction initiation followed by self-sustained slab retreat.

I first focus on the thermo-mechanical aspect of the problem. As the slab is allowed to travel thanks to fracturing occurring at its edges (at the so called STEP-faults [Subduction-Transform Edge Propagator]), I pay special attention to fracturing processes in these regions. Using the I3ELVIS thermo-mechanical code, I vary the physical properties of the Earth's layers and resulting deformation mechanisms. I show that localized deformation at the edges of the slab leads to converging STEP-faults and a narrowing of the slab. This is eventually followed by its detachment when the plate is narrow enough so that the slab pull fully detaches it. A contrario, I show that less localized deformation leads to diverging fracturing paths and a widening of the slab which eventually stops when the resistance to slab pull is high enough for the fracture to stop propagating. When a slab retreats in between continents, I observe that it does not follow the passive margins, for both localized and less localized deformation mechanisms.

In the second part of this work, I focus more precisely on the interactions between deep and surface processes in retreating subduction zones. I use a new mass conserving code for material diffusion and advection at the surface of the model, FDSPM (Finite Differences Surface Processes Model), coupled to the thermo-mechanical code I3ELVIS. I perform experiments aiming at understanding how the thickness of the sediment cover and surface processes affect the retreat dynamics for slabs retreating in an oceanic domain or along a continental margin. I find that the thicker the sediment cover, the slower the slab retreats as the sediments accumulate in large accretionary prisms which act as a lock

on the system. I also note that the sediment cover affects the retreat trajectory when the slab is retreating along a passive margin. There, the thicker the sediment cover, the more the slab deviates from the continent. The effect of surface processes on the slab dynamics also strongly depends on the amount of sediments available in the system. If there are very little sediments available, I find that the more efficient the surface processes, the slower the retreat rate. However, when a lot of sediments are available, such as along a passive margin, the more efficient the surface processes, the faster the retreat. This is likely due to erosion of the accretionary wedge which decreases the locking of the subduction interface.

In the third part of this thesis, I focus on other elements which could affect slab retreat. I define a synthetic case inspired by the Caribbean to assess if the slab dynamics I observe in my models are consistent with observations in this region. There, slab retreat would be towards a mid-oceanic ridge, which implies that the lithosphere is getting younger in the direction of slab retreat. As this is likely to influence the slab's behavior, I model retreating slabs with an age transition in the lithosphere, in the direction of slab retreat. In addition, as the slab would be retreating along the South American margin, a large amount of sediments are brought in the retreating system from the continent. I test how this influences the subduction evolution, and this, varying the surface processes efficiency. I find that an age transition in the subducting plate is changing the slab dynamics drastically. Instead of having a retreating slab which eventually breaks off via necking somewhere in the ocean, I systematically observe an early slab break off when the slab leaves the continent margin. There, instead of necking, I see a fast propagation of the STEP-fault located along the continent margin. The fault rotates toward the STEP located on the ocean side, triggering the formation of a horizontal tear in the slab. The whole slab detaches about 1 Ma after the horizontal tearing started. I observe a trench uplift in the topography, following the tear propagation. The surface processes have a less striking effect than the age transition. They again affect the slab trajectory and retreat rate. The more efficient the surface processes, the longer the slab retreats along the continental margin, the shallower the slab dip, the faster the retreat after subduction initiation, but the slower the retreat once an accretionary wedge forms and is large enough (about 3 Ma after subduction initiation in my experiments). When comparing these models with the topography in the Caribbean, I also observe the formation of an asymmetric accretionary wedge with a higher elevation close by the continent and a deep trench on the ocean side. However, in terms on slab structure my observations do not fit what was suggested by recent studies, such as for instance, the presence of a horizontal tear at shallow depth starting along the continent. If there has been some slab retreat in the Caribbean, other mechanisms are necessary to explain the evolution of that region.

As an outlook to this work, I started working on understanding the effects of localization of the deformation on slab retreat trajectory using an analytical approach. After building a first work balance for slab retreat I looked for an expression of the slab retreat rate as a function of quantities that I defined as constants in a first approximation, such as the slab width, its thickness and the mantle rheology. The aim would be to further develop

this work balance to find an expression the slab width as a function of the area affected by deformation at the tip of the STEP-faults.

Français

Les zones de subduction présentant une plaque plongeante qui recule sont des entités géologiques observables à plusieurs endroits sur Terre, comme par exemple dans la région de Scotia entre l'Amérique du Sud et l'Antarctique, ou encore, selon certaines études dans les Caraïbes. On repère ces structures en surface par la présence d'une fosse océanique incurvée située au dessus de la plaque plongeante. Dans ce type de zones de subduction, la plaque subductante s'enfonce dans le manteau terrestre, sous la force de son propre poids, ce qui génère un recul de la fosse. Ces structures se trouvent à l'interface entre la surface de notre planète et son intérieur. Par conséquent, leur évolution est potentiellement influencée par la dynamique interne de la Terre solide, mais aussi par des phénomènes de surface, comme l'accumulation de sédiments dans la fosse océanique, l'érosion de la topographie, ou encore par les propriétés physiques des matériaux entrant dans le manteau terrestre via subduction.

Dans ce travail, je cherche à comprendre les modalités de déplacement des plaques plongeantes qui reculent, et quels sont les facteurs qui influencent leur trajectoire, tant depuis la surface qu'en profondeur. Afin de répondre à cette question de recherche, je dois prendre en compte de nombreux éléments, depuis la composition et les caractéristiques mécaniques des couches terrestres, jusqu'aux mécanismes de surface. Je m'intéresse à la manière dont la plaque recule, mais aussi à l'évolution de la topographie lors la retraite de la plaque, un problème qu'il faut approcher en trois dimensions. Pour ce faire, j'effectue des simulations thermo-mécaniques dans lesquelles la subduction s'initie et se maintient spontanément.

Dans un premier temps, je me concentre sur l'aspect purement thermomécanique du problème. La plaque plongeante peut se déplacer grâce à la propagation de fractures à ses deux bords, aux failles STEP (propagateur transformant des bords de plaques subductantes). J'accorde une attention particulière au processus de fracture dans ces régions. J'utilise le code thermo-mécanique I3ELVIS et varie les propriétés physiques des couches terrestres et par conséquent les mécanismes de déformation. Je montre que les failles STEP convergent lorsque la déformation est localisée aux bords de la plaque plongeante. S'en suit un rétrécissement de la largeur de la plaque jusqu'à ce que celle-ci se détache par striction, lorsque la plaque est trop étroite pour supporter le poids de sa partie mantellique. À contrario, j'observe que lorsque la déformation est moins localisée, les chemins de fracture divergent, ce qui conduit à un élargissement de la plaque lorsqu'elle recule. La retraite s'arrête lorsque le poids de la plaque déjà subductée n'est plus suffisant pour continuer à fracturer la lithosphère. J'ai testé si le chemin de fracture est modifié par la présence de continents de part et d'autre de la plaque plongeante. D'après mes expériences, la plaque ne suit pas les marges continentales et a une trajectoire similaire lorsqu'elle recule entre deux continents que dans un milieu purement océanique.

Dans la deuxième partie de ce travail, je m'intéresse plus particulièrement aux interactions entre processus de surface et processus de profondeur lors du recul de la plaque plongeante. J'ai recours à un nouveau code pour traiter les processus de surface: FDSPM. Celui-ci permet l'advection et la diffusion des matériaux à la surface du modèle tout en conservant la masse. Je l'utilise couplé au code thermo-mécanique I3ELVIS. Mes expériences ont pour but de déterminer l'influence de l'épaisseur de la couverture sédimentaire ainsi que de l'efficacité des processus de surface (à quelle vitesse le matériel de surface bouge à la surface du modèle) sur le recul de la plaque plongeante, que ce soit dans un domaine océanique ou lorsque la plaque recule le long d'une marge passive. D'après mes simulations numériques, plus la couverture sédimentaire est épaisse, plus le recul de la plaque est lent. Il semble que ce ralentissement de la plaque soit dû à la formation d'un large prisme d'accrétion qui, à cause de la friction du matériel accumulé, agit comme un verrou pour le système. La trajectoire de la plaque est aussi affectée par l'épaisseur de la couverture sédimentaire: plus elle est épaisse, plus la plaque dévie du continent le long duquel elle se propageait initialement. Les processus de surface affectent eux aussi la dynamique de la plaque plongeante, mais cet effet est plus complexe et dépend de la quantité de sédiments disponibles à proximité de la zone de subduction. Lorsqu'il y a très peu de sédiments disponibles, plus les processus de surface sont efficaces, plus la plaque plongeante ralentit, et ce à cause de l'accrétion de matériel dans le prisme qui verrouille petit à petit l'interface. Lorsqu'il y a beaucoup de sédiments disponibles dans le système, comme par exemple lorsque la plaque recule le long d'un continent, l'efficacité des processus de surface est contraire. Dans les simulations où la plaque recule le long du continent, des sédiments sont en permanence apportés dans le système. Ceci, ajouté à la présence du continent, contribue à la formation d'un prisme asymétrique dont la topographie est plus haute du côté du continent. La topographie plus élevée est érodée par les processus de surface, ce qui contribue à la diminution de la taille du prisme, et diminue le verrou de l'interface, permettant à la plaque de reculer plus rapidement que lorsque les processus de surface sont moins efficaces.

Dans la troisième partie de cette thèse, je me concentre sur d'autres éléments qui pourraient affecter la dynamique de la plaque plongeante. Je construis un modèle inspiré des Caraïbes que je veux comparer aux observations dans cette région afin de déterminer si un mécanisme de recul de plaque pourrait expliquer l'évolution de la plaque des Petites Antilles. Dans ce système, cette dernière reculerait vers la dorsale océanique, ce qui implique que la plaque subductante est de plus en plus jeune au fil du recul. Afin de comprendre ce qu'une variation d'âge de la plaque implique pour la dynamique de subduction, nous effectuons deux séries d'expériences, l'une avec et l'autre sans variation d'âge de la lithosphère dans la direction du recul de la plaque. L'autre aspect intéressant de cette région, vient du fait que la plaque aurait reculé le long du continent Sud Américain, qui, notamment via le fleuve Orinoco, est une source considérable de sédiments pour le système. Étant donné que j'ai montré dans la partie précédente que la quantité de sédiments et l'efficacité des processus de surface avaient une influence sur la dynamique de la plaque, mes modèles impliquent une large quantité de sédiments en provenance du continent.

Je teste ces modèles avec différentes efficacités pour les processus de surface. Mes expériences montrent qu'une variation d'âge dans la plaque subductante change beaucoup la dynamique de subduction. En effet, plutôt que d'avoir une plaque qui recule en devenant plus étroite jusqu'à se détacher par striction une fois en plein domaine océanique, comme dans tous les modèles sans variations d'âge présentés dans ce travail, j'observe un détachement de la plaque bien plus précoce, lorsqu'elle s'apprête à quitter le domaine continental. De plus, le détachement ne s'effectue pas par striction mais par la propagation d'une déchirure horizontale qui est initiée par la croissance rapide et la forte rotation de la faille STEP du côté du continent vers le bord de la plaque situé du côté océanique. Cette déchirure horizontale se propage de manière à ce qu'environ 1 Ma après avoir été formée, elle ait généré le détachement de la totalité de la plaque plongeante. Je note aussi le soulèvement par isostasie de la topographie de manière conjointe à la propagation de la déchirure. Les processus de surface ont un effet moins marqué sur la dynamique de subduction. Je note que, comme suggéré dans la partie précédente, ils affectent la trajectoire de la plaque ainsi que la vitesse de recul. Plus les processus de surface sont efficaces, plus la plaque recule rapidement après initiation de la subduction. Cependant, lorsque, au fur et à mesure du recul de la plaque, du matériel s'accrète pour former un prisme, plus les processus de surface sont efficaces, plus le recul de la plaque est lent. Si cet effet est relativement clair lorsqu'il n'y a pas de transition d'âge dans la plaque, il est beaucoup moins clair lorsque la plaque devient plus jeune dans la direction de recul. En comparant mes modèles aux Caraïbes et plus précisément à la plaque des Petites Antilles, je remarque qu'un scénario de recul de plaque permet d'expliquer la formation d'un prisme d'accrétion asymétrique présentant une topographie élevée le long du continent ainsi qu'une fosse clairement définie du côté océanique de la plaque, et ce d'autant plus lorsqu'une transition est définie dans l'âge de la plaque subductante. Cependant, d'après les études tomographiques et de terrain, la structure de la plaque plongeante présentant une déchirure initiée le long du continent, ne correspond pas à la situation dans les Caraïbes. S'il est possible qu'un recul de la plaque se soit passé dans cette région, il faudrait étudier d'autres scénarios pour expliquer l'évolution géodynamique des Caraïbes.

En parallèle de ces expériences numériques, j'ai commencé à étudier les effets de la localisation de la déformation sur la plaque plongeante en utilisant une approche analytique. Un premier bilan de travaux impliqués dans la dynamique de subduction a été établi et j'ai recherché une expression pour le taux de recul de la plaque en fonction de paramètres pour l'instant considérés constants, comme la largeur de la plaque, son épaisseur etc pour une première rhéologie de matériaux. Le but serait maintenant de développer ces travaux préliminaires afin de trouver une expression donnant l'évolution de la largeur de la plaque en fonction de l'aire de matériaux déformée à l'extrémité des failles-STEP.