



## **PROPOSITION DE THÈSE ANNÉE UNIVERSITAIRE 2019 – 2020**

---

**Titre de la thèse :** Origine et circulations des fluides dans les zones de subduction

**Nom du directeur de thèse :** Hugues RAIMBOURG,

**Co-directeur de thèse:** Catherine Lerouge (BRGM), Stéphane Scaillet (ISTO)

**Laboratoire d'accueil et employeur:**

-Institut des Sciences de la Terre d'Orléans, Université d'Orléans

-BRGM

**Durée :** 3 ans

**Début de la thèse :** 1<sup>er</sup> Octobre 2019

---

## **Résumé public et mots-clés en Français** (15 lignes)

La compréhension des mécanismes de déformation actifs dans les zones de subduction est un enjeu majeur des Sciences de la Terre, en raison du très fort risque sismique qu'elles représentent. La rhéologie de l'interface des plaques est étroitement liée à l'eau qui est présente dans les pores de la roche, notamment par le biais de la pression de fluides. Néanmoins, les conditions de pression du fluide en profondeur, ou les échelles de temps et d'espace caractéristiques de sa circulation, sont très mal contraintes. Ce projet vise à tracer les circulations de fluides et les interactions fluides/roche des zones de subduction à partir de l'enregistrement par les veines dans des zones fossiles. Les sites d'étude choisis sont l'archipel Kodiak en Alaska, le prisme Shimanto au Japon et les domaines internes des Alpes. Le travail comprend deux parties : 1) une partie d'analyse structurale et micro-structurale de veines syn-cinématiques sur le terrain et un échantillonnage, et 2) une partie analytique en laboratoire des fluides piégés dans les inclusions fluides intégrant une étude géochimique par LA-ICP-MS (notamment les éléments tels que Li-Cl-B) et le développement d'une technique d'analyse in-situ de l'Ar et des gaz rares.

## **Titre, résumé et mots-clés en anglais** (pour affichage sur les sites internationaux)

Origin and circulation of fluids in subduction zones

The understanding of the deformation mechanisms in subduction zones is of major interest in the field of Earth Sciences, due to the high seismic risks in these zones. The rheology of the interface between tectonic plates is linked to the water present in the rock porosity, and to fluid pressure. However, pressure conditions of fluid at depth, timing of fluid circulations, and their scale remain not well constrained. The aim of this project is to trace fluid circulations and fluid/rock interactions in subduction zones by studying veins that represent their record in fossil subduction zones. The sites of this study are the Kodiak archipelago in Alaska, the Shimanto Belt in Japan and the internal domains of the Alps. The work includes two parts: 1) structural and micro-structural analysis of syn-kinematic veins on the field, a sampling of these veins, and 2) the analysis of the fluid trapped in fluid inclusions. The latter consist of a geochemical fluid study using ICP-MS laser (including Li-Cl-B) and the analytic development of in-situ measurement of Ar and rare gas.

## **Problématique scientifique/technique et objet de la thèse**

La compréhension des mécanismes de déformation actifs dans les zones de subduction est un enjeu majeur des Sciences de la Terre, en raison du très fort risque sismique qu'elles représentent. La rhéologie de l'interface des plaques est étroitement liée à l'eau qui est présente dans les pores de la roche, notamment par le biais de la pression de fluides (e.g. [1, 2]), comme proposé pour rendre compte par exemple des épisodes de "glissement lent" [3]. Néanmoins, les conditions de pression du fluide en profondeur, ou les échelles de temps et d'espace caractéristiques de sa circulation, sont très mal contraintes.

A cause du rôle essentiel joué par les fluides sur la rhéologie, ce projet vise ainsi à élaborer un **modèle hydrologique des zones de subduction, comprenant les sources et les transferts, à partir de l'enregistrement par les veines dans des zones fossiles.**

Notre travail jusqu'à présent a permis de proposer un modèle de circulation de fluide aux profondeurs sismogéniques avec deux grands types de fluide, l'un local, l'autre exotique, qui infiltrent à tour de rôle la roche [4, 5]. Ce modèle a été construit sur l'analyse microstructurale et en cathodoluminescence de veines (Figure 1) prélevées dans les Alpes et dans le prisme d'accrétion Shimanto au Japon. Dans le cadre de cette thèse, nous proposons d'étendre ce modèle à une autre zone fossile, considérée comme un exemple classique de zone de subduction, dans l'archipel Kodiak en Alaska, en réalisant des observations structurales et microstructurales des veines syn-cinématiques et en prélevant des échantillons.

En utilisant ces trois zones cibles (Japon, Alpes, Alaska), l'objectif principal du projet est de déterminer les géométries et temps caractéristiques des circulations de fluides, en s'appuyant sur les signatures géochimiques à la fois des fluides piégés dans des inclusions fluides, mais aussi des minéraux qui précipitent au même moment. Dans un deuxième temps, ces signatures seront interprétées en termes de sources, à partir des équilibres fluide-roche et des réactions métamorphiques à l'œuvre pendant l'enfouissement, pour les différentes lithologies impliquées.

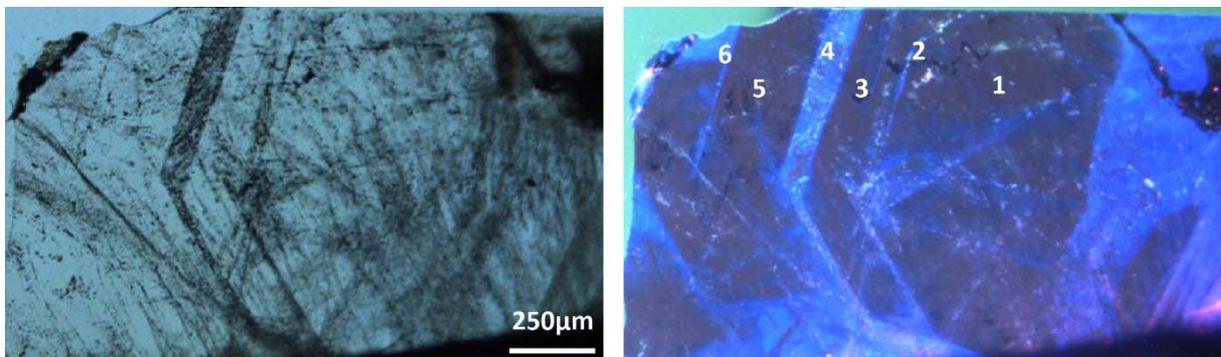


Figure 1 : Bandes de croissance dans des cristaux de quartz automorphes au Cœur de veines syn-cinématiques du prisme d'accrétion Shimanto au Japon. Les bandes de croissance ont des luminescence alternativement bleu et marron (image en cathodoluminescence à droite), indiquant la présence de deux fluides distincts, ou bien de conditions de précipitation distinctes.

### **Etat de l'art :** (< 20 lignes)

Ce projet est basé sur un paradoxe concernant les circulations de fluide: alors que les signatures géochimiques, fondées en majorité sur des approches « roche totale », montrent que les sédiments ou la croûte en subduction évoluent comme des systèmes chimique fermés [6-8], les modèles métamorphiques indiquent que les roches se déshydratent de façon significative pendant leur enfouissement [9-11]. En d'autres termes, les transferts d'eau à grande échelle sont efficaces, mais ils ne sont pas enregistrés par la chimie de la roche totale.

Ce paradoxe nous amène donc à proposer une approche géochimique in situ, ciblée sur les témoins les plus directs des circulations de fluide profondes, c'est-à-dire les inclusions fluides et les minéraux qui les contiennent, au sein des veines syn-cinématiques.

Les analyses géochimiques par ablation laser permettent de cibler l'un ou l'autre des types de quartz observables en cathodoluminescence. Les concentrations en solutés des fluides dans les

inclusions obtenues par cette méthode constituent une première signature pour contraindre l'origine de ces fluides (à partir par exemple des éléments tels que Li, B ou Cl [12, 13]).

De plus, l'analyse de l'argon et les gaz rares offre un moyen supplémentaire de traçage des fluides métamorphiques. L'argon radiogénique issu des assemblages minéralogiques recristallisés en profondeur peut être utilisé pour estimer l'importance de l'héritage de la roche sur le fluide et l'intensité des rééquilibrations eau-roche, ainsi que les distances caractéristiques de transport des isotopes de l'argon dans la fluide [14, 15]. L'étude des isotopes de l'argon peut aussi être complétée par la mesure des quantités d'autres gaz rares (Ne, Ar, Kr, Xe) produits à partir des halogènes (F, Cl, Br, I) après irradiation sous neutrons, afin d'estimer les concentrations de ces derniers dans les inclusions fluides ou les minéraux des veines. [16, 17].

L'ensemble des méthodes d'analyse mises en œuvre dans le projet, visant à déterminer le plus précisément possible les signatures des fluides qui circulent, reposent sur une haute-résolution spatiale, rendue nécessaire par la complexité des structures. Ces techniques très innovantes, notamment celles reposant sur les isotopes de l'argon, sont en partie encore à développer dans les plates-formes instrumentales de l'ISTO. Leur mise au point permettra d'aborder une vaste gamme de problèmes de traçage, pour lesquels l'approche en roche totale est inadéquate. L'ambition de cette thèse est donc double, d'une part répondre à la question des circulations de fluide dans les zones de subduction, d'autre part développer des traceurs et des méthodes d'analyse transposables à d'autres contextes et problématiques géologiques.

### **Programme de travail**

Analyse et échantillonnage sur le terrain : Les cibles envisagées sont les zones de subduction japonaises (prisme Shimanto), les Alpes et l'archipel de Kodiak en Alaska. Tandis que pour cette dernière zone, l'échantillonnage est prévu pour l'été 2019 (en collaboration avec Donald Fisher, PennStte University, USA), pour le Japon et les Alpes de nombreux échantillons sont déjà disponibles et permettent d'effectuer toute le développement du protocole d'analyse.

Analyse des éléments traces, équilibre minéral fluide: Ce volet consiste à caractériser par l'imagerie optique et en cathodoluminescence (CL) les différentes générations de veines, puis à analyser par LA-ICPMS les compositions en éléments-traces de ces générations (appareil LA-ICP-QMS Agilent disponible à l'ISTO), ainsi que les compositions des fluides occlus. Pour les échantillons du prisme Kodiak, une caractérisation préalable des inclusions fluides par microthermométrie sera aussi mise en oeuvre. En parallèle, les compositions des minéraux de la roche-hôte susceptibles d'être impliqués dans les équilibres eau-roche seront eux aussi analysés, pour d'une part réaliser des grilles pétrogénétiques (à partir des éléments majeurs) et d'autre part estimer les sources en éléments traces. La CL sera aussi utilisée pour décrire les transferts locaux entre le fluide et la roche hôte.

Analyse des isotopes de l'Argon : Ce projet, développé au laboratoire Ar-Ar de l'ISTO, demandera le développement de protocoles d'analyse innovants faisant appel à l'ablation in situ au laser pulsé UV de façon à optimiser l'extraction et la purification des gaz rares en solution dans les fluides occlus. Les échantillons seront analysé soit sans soit après irradiation, pour obtenir la composition isotopique en argon des fluides occlus dans le premier cas, et l'«âge» du

piégeage, ainsi que les rapports élémentaires en halogènes, dans le deuxième cas. Il est à noter qu'une deuxième technique d'extraction, dite de stepped crushing sous vide, sera mise en œuvre en parallèle avec l'appui de laboratoires partenaires (Pr Huaning Qiu, China University of Geosciences, Wuhan).

**Profil de candidature souhaitée (en Français et en anglais) pour affichage sur les sites nationaux et internationaux.**

**Profil FR**

Nous recherchons un étudiant titulaire d'un master en Sciences de la Terre, ayant de solides connaissances en tectonique et/ou géochimie et désireux de développer son expertise dans ces deux disciplines dans le cadre d'une thèse. L'étudiant devra être motivé par le travail de recherche, aussi bien sur le terrain qu'en laboratoire. Il/elle devra faire preuve d'autonomie dans son travail et de rigueur scientifique dans son approche des questions scientifiques. Un bon niveau d'anglais est nécessaire ou devra être acquis rapidement pour publier les résultats de la thèse dans des revues internationales.

**Profil EN**

We are seeking a student with a master degree in Earth Sciences, with a strong background in tectonics and/or geochemistry, and willing to strengthen his/her expertise in these topics during the Ph.D.. The candidate should be motivated by research work in the field and in the lab. He/she should be independent in his/her work and have a rigorous approach of scientific issues. Fluent english is necessary to publish his/her results in international publications.

**Procédure de candidature**

Le poste est ouvert aux personnes diplômées d'un master en Sciences de la Terre au moment de la prise de fonction (1<sup>er</sup> Octobre 2019). Le contrat de thèse est de 3ans. Le/la candidat(e) enverra par email à Catherine Lerouge ([c.lerouge@brgm.fr](mailto:c.lerouge@brgm.fr)) et Hugues Raimbourg ([hugues.raimbouq@univ-orleans.fr](mailto:hugues.raimbouq@univ-orleans.fr)) les pièces suivantes **avant le 29 Avril 2019** :

- Un CV
- Les relevés de notes de Master (indiquant les classements au sein de la promotion)
- Les contacts de deux personnes référentes, ayant par exemple encadré le/la candidat(e) lors d'un stage de recherche

***Application Procedure***

Qualified individuals need to have a MSc-degree in Geosciences at the time of appointment. The Ph.D contract is for 3 years, starting on the 1<sup>st</sup> October 2019. Applicants should send by email to Catherine Lerouge ([c.lerouge@brgm.fr](mailto:c.lerouge@brgm.fr)) and Hugues Raimbourg ([hugues.raimbouq@univ-orleans.fr](mailto:hugues.raimbouq@univ-orleans.fr)) the following documents **by the 29<sup>th</sup> April 2019**:

- CV
- M.Sc. grades

-Two reference contacts

- [1].Lachenbruch, A.H., J. Geophys. Res., 1980. **85**(B11): p. 6097-6112.
- [2].Rice, J.R., J. Geophys. Res, 2006. **111**(B05311): p. 1-29.
- [3].Kodaira, S., et al., Science, 2004. **304**: p. 1295-1298.
- [4].Raimbourg, H., et al., Geosphere: Subduction top to bottom 2, 2018. **14**(1): p. 1-23.
- [5].Raimbourg, H., et al., Tectonophysics, 2015. **655**: p. 161-176.
- [6].Bebout, G.E., in *The crust, treatise on geochemistry*. 2007. p. 1-50.
- [7].Bebout, G.E., et al., Chem. Geol., 2013. **342**: p. 1-20.
- [8].Mullis, J., et al., Geochim. Cosmochim. Ac., 1994. **58**: p. 2239-2267.
- [9].Hacker, B.R., Geochemistry Geophysics Geosystems, 2008. **9**(3): p. 1-24.
- [10].Van Keken, P.E., et al., J. Geophys. Res., 2011. **116**(B01401): p. 1-15.
- [11].Fagereng, A., et al., GSA Spec. Pap., 2018. **534**: p. 187-215.
- [12].Yoshida, K., et al., Lithos, 2015. **226**: p. 50-64.
- [13].Scambelluri, M., et al., Earth Planet. Sci. Lett., 2001. **192**: p. 457-470.
- [14].Baxter, E.F., et al., Geochim. Cosmochim. Ac., 2002. **66**: p. 1067-1083.
- [15].Smye, A.J., et al., Geochim. Cosmochim. Ac., 2013. **113**(94-112).
- [16].Kendrick, M.A., et al., Geology, 2012. **40**: p. 1075-1078.
- [17].Ruzié-Hamilton, L., et al., Chem. Geol., 2016. **437**: p. 77-87.