

Avis de Soutenance

Monsieur Bence HORÁNYI

Sciences de l'Univers

Soutiendra publiquement ses travaux de thèse intitulés
Contraintes expérimentales sur la genèse des granites et des pegmatites riches en lithium

Travaux dirigés par Monsieur Fabrice GAILLARD
Ecole doctorale : Energie, Matériaux, Sciences de la Terre et de l'Univers - EMSTU
Unité de recherche : ISTO - Institut des Sciences de la Terre d'Orléans

Soutenance prévue le **lundi 01 juin 2026** à 14h00
Lieu : 1A Rue de la Ferrollerie, 45071 Orléans, France
Salle : Amphithéâtre OSUC (E018)

Composition du jury proposé

M. Fabrice GAILLARD	Directeur de recherche	ISTO-CNRS	Directeur de thèse
M. François HOLTZ	Professor	Leibniz University Hannover	Rapporteur
M. Zoltán ZAJACZ	Professeur	University of Geneva	Rapporteur
M. Jérémie MELLETON	Docteur	BRGM	Co-directeur de thèse
M. Jon BLUNDY	Professeur	University of Oxford	Examineur
M. Axel MÜLLER	Professeur	Natural History Museum of Oslo	Examineur
Mme Caroline MARTEL	Directrice de recherche	ISTO-CNRS	Examinatrice
Mme Kathryn GOODENOUGH	Docteure	British Geological Survey	Examinatrice
M. Austin GION	University of Oxford	Invité	
M. Michel PICHAVANT	ISTO-CNRS	Invité	

Mots-clés : Lithium, Pegmatite granitique, Pétrologie expérimentale, Coefficients de partage, Anatexie crustale, Cristallisation fractionnée

Résumé :

Le lithium, métal critique pour la transition énergétique, est principalement extrait de granites à métaux rares et pegmatites (RMGPs), qui fournissent 50 % de l'approvisionnement mondial. Cependant, le mécanisme d'enrichissement en lithium des RMGPs à teneur économique (> 5 000 ppm) reste débattu. Deux modèles s'opposent : la cristallisation fractionnée de magmas granitiques ou la fusion partielle de roches métasédimentaires enrichies. Les trop larges incertitudes sur le partage du lithium entre minéraux et liquides felsiques sont des éléments bloquant dans la progression du débat. Pour affiner ces mécanismes, des expériences de fusion partielle et de cristallisation ont été réalisées respectivement sur des roches métasédimentaires et des verres felsiques. Des coefficients de partage ont été déterminés entre les minéraux (micas, feldspaths, quartz, staurotide, cordiérite, grenat et tourmaline) et des liquides felsiques contenant entre 50 et 6000 ppm de lithium. Ces coefficients expérimentaux ont été comparés à la distribution des métaux rares dans la rhyolite de Richemont, considérée comme l'équivalent volcanique des RMGPs. Ces coefficients de partage compilant expériences de laboratoire et observations sur la rhyolite de Richemont, varient jusqu'à deux ordres de grandeur. Cette variabilité a été paramétrée à l'aide de formules empiriques afin de décrire l'évolution des coefficients de partage en fonction des conditions expérimentales et de la composition des minéraux et des liquides. Les résultats révèlent que le lithium devient compatible dans les micas, mais de plus en plus incompatible dans les feldspaths et le quartz au cours de la différenciation magmatique. Afin de proposer un cadre théorique décrivant l'évolution des coefficients de partage en fonction de la composition du liquide, l'effet du lithium sur la structure des liquides granitiques a été étudié par spectroscopie de résonance magnétique nucléaire (RMN). Des spectres RMN ont été obtenus à partir de verres felsiques naturels et synthétiques contenant jusqu'à 2 % massique de lithium. Les résultats sont cohérents avec une compensation de charge de l'aluminium tétraédrique par le lithium, ce qui entraîne une évolution de la structure moléculaire des liquides, passant d'un caractère peralumineux à peralcalin lors de l'enrichissement progressif en lithium. Cette transition compositionnelle au cours de la différenciation magmatique conduit à une incompatibilité croissante du lithium dans le quartz, et dans une moindre mesure dans les feldspaths. Une modélisation des éléments traces utilisant les nouveaux coefficients de partage suggère un processus en deux étapes pour la formation des RMGPs : 1) Fusion partielle de

roches crustales enrichies (> 300 ppm Li), 2) Cristallisation fractionnée modérée des liquides extraits (> 1 500 ppm Li), où le lithium, devenu incompatible, s'enrichit exponentiellement dans le liquide résiduel. Cette approche combinée, données expérimentales et modélisation, éclaire la pétrogenèse des RMGPs et souligne la nécessité de considérer des lithologies crustales enrichies comme point de départ. Afin de progresser et d'affiner ces modèles d'enrichissement, nous concluons sur le besoin de modèles thermodynamiques robustes qui contraignent davantage les équilibres de phases à basse température dans les systèmes felsiques, très fractionnés, enrichis en métaux rares, phosphore et fluor.

Summary:

Lithium is a high-demand critical metal that is widely used in modern-day technologies that are required for a global energy transition. Approximately 50% of the global lithium supply is sourced from rare-metal granites and pegmatites (RMGPs). In order to meet the rising demand for lithium, it is imperative to discover new ore deposits, which requires precise petrogenetic constraints on the formation of RMGPs. However, despite the economic significance of granitic pegmatites, the mechanism of lithium enrichment in economic-grade deposits (>5000 ppm lithium) relative to conventional granitic rocks in the crust (<100 ppm lithium) remains widely debated. The two competing petrogenetic models of RMGPs include either the high-degree fractional crystallisation of granitic melts or the partial melting of enriched metasedimentary rocks. The degree of lithium enrichment during these processes remains debated due to a lack of precise constraints on the partitioning of lithium between minerals and felsic melts. In order to better constrain the partitioning behaviour of lithium during magmatic processes, partial melting and crystallisation experiments were performed on metasedimentary rocks and felsic glasses, respectively. Partition coefficients were determined between minerals (micas, feldspars, quartz, staurolite, cordierite, garnet, and tourmaline) and felsic melts that contain 50-6000 ppm lithium. To further constrain the partitioning behaviour of lithium, experimental partition coefficients were compared with the distribution of rare metals in the Richemont rhyolite, which is regarded as the extrusive equivalent of RMGPs. Newly-obtained partition coefficients from the experiments and the Richemont rhyolite vary by up to two orders of magnitude. This variation was parameterised using empirical formulae to capture the evolution of partition coefficients as a function of experimental conditions and the compositions of minerals and melts. The parameterised partition coefficients are consistent with lithium becoming compatible in micas, but increasingly incompatible in feldspars and quartz during magmatic differentiation. To provide a theoretical framework for the modelled evolution of partition coefficients as a function of melt composition, the effect of lithium on the structure of pegmatite-forming melts was investigated by nuclear magnetic resonance (NMR) spectroscopy. NMR spectra were obtained from natural and synthetic felsic glasses containing up to 2 wt% lithium. The results are consistent with the charge compensation of tetrahedral aluminium by lithium, which shifts the molecular structure of the melts from peraluminous to peralkaline during the progressive enrichment of lithium. The transition in melt composition during magmatic differentiation results in lithium becoming increasingly incompatible in quartz and to a lesser extent in feldspars. To constrain the petrogenesis of RMGPs, trace element modelling was performed using newly-obtained partition coefficients to simulate the enrichment of lithium during crustal anatexis and fractional crystallisation. Partition coefficients were incrementally varied to capture the evolving compositions of minerals and melts as a function of temperature. The results from the modelling are consistent with rare-metal granites and pegmatites forming in a two-stage process, involving the partial melting of enriched crustal rocks (>300 ppm lithium), followed by the moderate fractional crystallisation of the extracted melts (>1500 ppm lithium). Lithium becomes highly incompatible in pre-enriched anatectic melts, which induces a runaway effect, wherein extracted melts can become efficiently enriched during protracted fractional crystallisation to produce RMGPs. To further constrain petrogenetic models, future studies must combine the use of experimental partition coefficients and robust thermodynamic phase equilibria in low-temperature felsic systems that are enriched in lithium.