

MAGMAS ET FLUIDES PROFONDS

Animateurs : François Faure et Etienne Deloule

Ce thème a pour objectif de fédérer les actions conduites au CRPG autour des transferts de matière en liaison avec les processus magmatiques et les fluides profonds. Notre approche, géochimique et pétrologique, repose sur la quantification des flux entre les différentes enveloppes de la Terre et sur la détermination de leur cinétique. Nous nous limitons à quelques chantiers permettant d'aborder ces transferts sous quelques aspects spécifiques (fusion partielle, transferts magmatiques, hétérogénéités isotopiques, cristallisation et genèse d'anomalies géochimiques d'intérêt économique) et à différentes échelles (de celle de l'atome pour la diffusion de l'He à celle du minéral pour les textures et à l'échelle globale pour les flux de matière).

TRAÇAGE ET CINÉTIQUE DES PROCESSUS MAGMATIQUES

Chercheurs : Pierre Barbey, Pete Burnard, Françoise Chalot-Prat, François Faure, David Jousset, Béatrice Luais, Bernard Marty, Laurie Reisberg.

Collaborations : R. Clocchiatti (CEA Saclay), P. Schiano (Clermont), P. Bachèlery (La Réunion), G. Gleizes, Y. Denele et M. Toplis (Toulouse), D. Gasquet (Chambéry), F. Bussy (Lausanne), D. Graham (Oregon State Univ.), K. Farley (Cal. Tech.), M. Norman, (Tasmanie), D.H. Green (Canberra), M. Godard et D. Bosch (Montpellier)

Doctorants : A. Colin, B. Welsch.

Financement : ANR MIME «programme blanc» 2007, région (demande en cours), RSES ANU, SEDIT 2007, projet SEDIT soumis, Bourse ministère.

TEXTURES ET TRAÇAGE DES PROCESSUS MAGMATIQUES

L'objectif est de comprendre les processus se produisant, à différentes échelles, à la transition liquide/solide. L'utilisation de l'outil «texture» s'est révélée à cet égard particulièrement efficace pour apporter des contraintes sur la cinétique des processus magmatiques. Notre approche est (i) d'aborder par l'expérimentation le problème de la signification des textures et de leur utilisation comme indicateur quantitatif (nucléation, croissance, morphologie cristalline, etc...) et (ii) de les utiliser comme traceur pétrogénétique sur des cibles naturelles (litage magmatique, distribution et évolution des liquides, etc...).

Nucléation, croissance, morphologie cristalline et diagrammes de phases métastables

L'interprétation des textures repose sur l'étude des morphologies minérales, de la distribution en taille des cristaux (CSD) et des relations de phases à l'équilibre et hors d'équilibre (diagramme de phases). Cependant, le développement d'un tel outil vers une quantification de plus en plus précise de la cinétique implique à la fois des études expérimentales et la confrontation de ces résultats avec les observations effectuées sur des systèmes naturels. D'un point de vue expérimental, plusieurs chantiers seront menés:

(i) quantifier le rôle crucial joué par la nucléation et, en particulier, son retard sur la cristallisation des roches magmatiques ;

(ii) déterminer la vitesse et les mécanismes de croissance des différentes faces cristallines des minéraux cardinaux des roches magmatiques ;

(iii) établir les champs de stabilité des différentes morphologies cristallines en fonction des vitesses de refroidissement et du degré de surfusion.

L'objectif est d'établir une relation entre ces différents paramètres qui traduisent tous l'état de déséquilibre chimique qui règne au moment de la cristallisation du magma. Cependant, une telle relation nécessite de disposer de diagrammes de phases métastables, travail expérimental complexe mais fondamental qui reste à accomplir.

Distribution et évolution du liquide magmatique sous le Moho océanique

Dans un contexte où les premières données géophysiques sur la limite manteau-croûte sous la dorsale Est-Pacifique changent radicalement notre compréhension du dynamisme des dorsales (Toomey *et al.*, 2007), l'observation de la zone de transition manteau-croûte dans les ophiolites est

une nécessité pour valider de nouveaux modèles de dorsale. L'étude de la zone de transition du Moho dans l'ophiolite d'Oman a déjà conduit à la reconnaissance de zones de circulation de liquide. Notre but sera d'y comprendre la formation de lentilles de gabbros lités. Un affleurement

exceptionnel dans le massif de Semail, encore non décrit, montre une évolution progressive entre des dunites non déformées et imprégnées de plagioclase et des gabbros au litage grossier, où la dunité encaissante est faiblement déformée. Une attention particulière sera portée sur l'évolution des textures, les variations de proportion modale,

de fabrication de forme des poches de plagioclase et de la fabrication de réseau de l'olivine du manteau encaissant ou des lits riches en olivine au sein des gabbros. Cela permettra de mieux comprendre les processus d'accumulation de magma à l'interface lithosphère-asthénosphère et leur rôle dans le dynamisme des dorsales rapides.

Litage magmatique et textures réactionnelles dans les granites

Nous avons obtenus quelques résultats intéressants tant sur la cinétique des réactions ayant lieu à la transition solide/liquide dans la croûte continentale (Barbey, 2007) que sur la nature des processus impliqués lors de la mise en place des plutons granitiques (e.g. Pons *et al.*, 2007). Nous poursuivrons ces approches selon deux directions. Il s'agit, d'une part, d'utiliser les textures réactionnelles et la cinétique qu'elles reflètent comme marqueur de la durée de certains processus tels que la mise en place d'un dôme anatectique. En utilisant les textures particulières de la cordiérite nous voulons, sur l'exemple du Velay, tenter d'estimer les temps de formation du dôme. Il s'agit, d'autre part, de comprendre la genèse du litage magmatique dans les granites. A partir de la caractérisation des structures du litage magmatique ainsi que des microtextures

et de la zonation chimique des minéraux, nous avons déterminé quel rôle spécifique jouait la cristallisation fractionnée, les mouvements relatifs liquides-cristaux et la déformation dans la formation des plutons granitiques. Nous avons, par ailleurs, montré quel était le rôle des magmas basiques, d'une part sur la formation des litages magmatiques et, d'autre part, sur le fonctionnement d'une chambre magmatique acide. Une partie de ces résultats est encore en cours de publication. Notre objectif est maintenant d'appréhender les litages magmatiques dans une vue synthétique – en insistant plus sur le rôle de la déformation – en montrant comment ils reflètent des processus impliqués dans la genèse des plutons et dômes anatectiques (fusion partielle, cristallisation fractionnée, agrégation et mélange de magmas, déformation).

TRANSFERT ET HÉTÉROGÉNÉITÉS MANTELLIQUES

Les mouvements de convection dans le manteau terrestre favorisent les transferts de matière du manteau inférieur vers le manteau supérieur et la surface. La quantification de ces processus de transferts peut être abordée par l'étude géochimique et isotopique comparée du magmatisme océanique intraplaque, l'expression en surface des points chauds et du magmatisme de ride. Les trois volets suivants seront abordés.

Interaction ride-panache par l'étude de la région du «Galapagos Spreading Center» (GSC)

Les données de bathymétrie, de géophysique, de pétrologie et de géochimie indiquent clairement une interaction entre ride et panache dans cette région. Cependant, les données isotopiques d'He mesurées tout au long des différents segments de la ride du GSC montrent des valeurs typiques

des MORB. Nous sommes en train d'analyser les isotopes de Ne et d'Ar dans les basaltes du GSC afin de vérifier si l'absence d'un signal isotopique du type panache est spécifique à l'He ou si cette absence concerne toutes les espèces volatiles.

Études expérimentales de la répartition de l'He et de l'Ar

Contre toute attente, des résultats récents (Parman *et al.*, 2005; Watson *et al.*, 2007) suggèrent que l'He est plus compatible que l'uranium lors de la fusion partielle du manteau, ce qui a des implications fortes pour l'interprétation des données $^3\text{He}/^4\text{He}$ des basaltes. Nous effectuons de nouvelles expériences avec des olivines dopées en He-4, puis irradiées avec des protons afin de produire l'He-3 dans la matrice de l'olivine. L'extraction par paliers de température de l'He de ces olivines «dopées – irradiées» devrait séparer l'He dissous dans la matrice d'une façon homogène et correspondant à la vraie solubilité

de l'He dans l'olivine, de celui qui est piégé dans des inclusions/défauts. Nous entamons une autre étude expérimentale afin de déterminer les solubilités de l'He et de l'Ar dans les liquides carbonatés. Le fractionnement observé des gaz rares par rapport aux éléments en traces lithophiles (Pb, Sr, Nd...) a été parfois attribué à la fusion des carbonates. Cependant, les solubilités de l'Ar et de l'He dans des liquides carbonatés sont très mal connues. Nous sommes en train de mesurer les solubilités de ces éléments dans des carbonates fondus de Ca et de Mg à haute température (800-1100°C) sous flux de CO_2 .

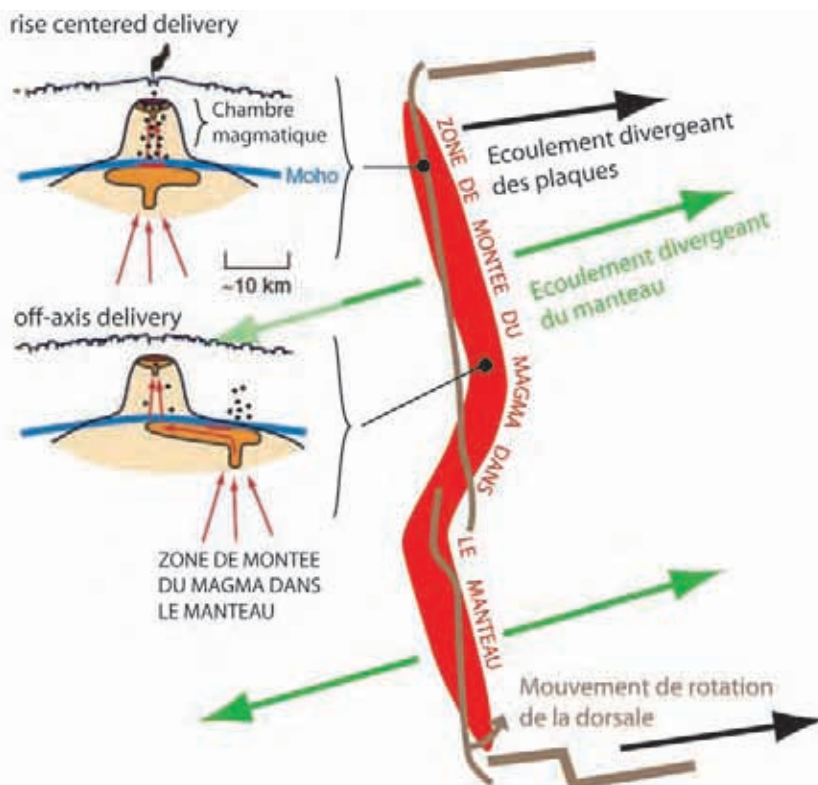
Flux de matière noyau-manteau

La détermination de la composition du manteau inférieur peut être modifiée par des flux de matière (éléments sidérophiles) du noyau vers le manteau inférieur sous des conditions oxydantes (Jones et Drake, 1986). Cette problématique sera abordée par l'étude élémentaire et isotopique du germanium. Cet élément moyennement sidérophile peut être un traceur des mécanismes de transferts chimiques noyau-manteau pour les trois raisons suivantes: (i) Ge est un des éléments-clés des météorites de fer, représentatives du noyau, et dont la composition isotopique est bien déterminée ; (ii) le rapport élémentaire Ge/Si est un traceur des hétérogénéités mantelliques et de la profondeur de fusion des basaltes océaniques

(De Argollo et Schilling, 1978a, b) ; et (iii) les fractionnements élémentaire et isotopique de Ge entre phase métal et silicate seraient contrôlés par la fugacité d'oxygène. Les basaltes océaniques d'origine profonde devraient enregistrer ces fractionnements à l'interface noyau-manteau. Une étude particulière sera focalisée sur Hawaï où ce transfert de matière a été mis en évidence par le système Re-Pt-Os (Brandon *et al.*, 1998, 1999), alors qu'il n'a pas été identifié par le système isotopique Hf-W (Shersten *et al.*, 2004). Des analyses isotopiques du Ge seront effectuées sur les basaltes océaniques d'origine plus superficiels ainsi sur les MORB, où ce signal isotopique en Ge du noyau devrait être absent.

LE MAGMATISME SOUS LES DORSALES

La genèse de basaltes aux rides médio-océaniques à partir de péridotites mantelliques est l'un des processus de premier ordre de la différenciation chimique de la Terre. De récents résultats modifient notre compréhension de ce processus de genèse. A l'axe des dorsales, le manteau océanique apparaît fortement métagénésé par des liquides de type MORB (Piccardo *et al.*, 2006), et les basaltes émis correspondent plus souvent à des liquides différenciés qu'à des liquides dits primitifs. En sus, à l'axe des dorsales rapides



actuelles, la géophysique montre que, sur près de 50% de la longueur d'un segment de dorsale, le magma arrive à plus de 5 km à l'écart de la dorsale (Toomey *et al.*, 2007). Ces variations de distance entre la zone d'arrivée du magma et l'apex de la ride pourraient conditionner non seulement la fréquence des éruptions mais aussi la composition des basaltes et gabbros (Fig.MFP1 ci-contre). Ces résultats posent plusieurs questions et ouvrent des perspectives originales de recherche:

- (i) quelle est la composition du basalte en équilibre avec le manteau à des pressions inférieures à 1GPa ?
- (ii) quelle est la nature des interactions entre le magma et la roche encaissante dans un contexte éloigné de la dorsale ?
- (iii) quels sont les mécanismes et les effets du dégazage des liquides basaltiques lors de ces parcours plus ou moins rapides jusqu'à l'éruption?

Fig.MFP1. La première image d'une tranche de manteau, à 8 Km de

profondeur sous la dorsale Est-Pacifique (Toomey *et al.*, 2007) révèle que les zones riches en magma ne sont pas toujours exactement à l'aplomb de la dorsale, comme on le croit, mais peuvent s'en écarter de plus de 10 Km. Là où les zones riches en magma se trouvent sous la dorsale, les éruptions volcaniques sont plus fréquentes et les phénomènes hydrothermaux plus vigoureux. Quand le magma arrive sous le Moho à distance de l'axe, celui-ci peut se dégazer et se différencier avant de nourrir la chambre magmatique; les éruptions volcaniques sont alors peu nombreuses, et l'activité hydrothermale est réduite. Les variations de l'activité de la ride ne sont donc pas due à des variation du taux d'alimentation en magma, mais au trajet suivi par le magma.

Expérimentation sur la genèse des MORB à basse pression

Selon les concepts actuels, les MORB correspondent plus rarement à des liquides «primitifs» qu'à des liquides «différenciés». Ces derniers pourraient être formés par percolation/réaction de liquides primitifs avec le manteau traversé à basse pression avant éruption, et/ou par fusion partielle du manteau par décompression adiabatique à faible profondeur (<1 GPa). Ces hypothèses sont testées dans un projet de pétrologie expérimentale (en cours depuis 2005) destiné à établir, pour des pressions

de 7.5kb, 5kb et 3.5kb, la composition des liquides en équilibre avec une lherzolite mantellique à 5 phases (plag/ol/opx/cpx/sp) et la gamme des températures correspondantes. Les données obtenues conduisent à la construction d'une grille de référence P–T–X permettant de repérer non seulement les compositions de liquides mais aussi des sources et résidus mantelliques provenant aussi bien des océans actuels qu'anciens. Ces 3 paramètres sont des contraintes majeures pour comprendre la dynamique mantellique.

Distribution et évolution du magma basaltique sous le Moho océanique

L'étude de la zone de transition du Moho dans l'ophiolite d'Oman a conduit à la reconnaissance de zones de circulation de liquide. En nous basant sur cette reconnaissance, nous avons identifié deux sites du massif de Semail permettant d'étudier en détail la circulation, l'évolution et le stockage de magma dans le manteau superficiel. Dans la première région (Mahram), le manteau superficiel est riche en plagioclase et en lentilles de gabbro lité. Ce site est identifié comme étant sous-jacent à la paléo-ride d'Oman. La deuxième

région (Mansah) est interprétée comme étant éloignée de l'axe (Jousselin et Nicolas, 2000). Le manteau de Mansah est pauvre en plagioclase et en lentilles de gabbro, mais très riche en pyroxénite. Nous proposons donc d'étudier les compositions en éléments traces et les isotopes radiogéniques (Sr,Nd,Pb,Os) pour comparer la source des magmas d'une zone à l'autre et étudier les interactions possibles entre le magma et la roche encaissante.

Les mécanismes et effets du dégazage des magmas sous les dorsales

Le dégazage des magmas lors de leur transport au travers de la croûte océanique donne lieu à une modification de leurs teneurs en éléments volatils. De ce fait, il n'est possible d'estimer, ni les concentrations, ni le comportement de ces éléments dans le manteau convectif à partir de leurs teneurs dans des MORB. Heureusement, la différence de solubilité entre les gaz rares (He, Ne, et Ar) et le CO₂ dans les liquides silicatés entraîne un fractionnement entre ces espèces volatiles, ce qui nous permet de tracer et de quantifier ce dégazage. La composition en volatils (He, Ar, Ne, N, CO₂) de chaque vésicule d'un basalte donné enregistre l'état du dégazage lors de sa formation, ce qui entraîne une gamme de composition très variée à l'échelle d'un seul échantillon. Nous disposons de nouveaux équipements (laser Excimer) pour effectuer une analyse bulle par bulle. Une vingtaine de bulles par échantillon de verre sera analysée pour bien définir la tendance de dégazage pour chaque basalte. Une fois cette

tendance bien définie, la composition en éléments volatils du liquide parental sera calculée. Par ailleurs, les teneurs en Re, l'élément père du couple radiogénique Re-Os, risquent aussi d'être perturbées par le dégazage sous les dorsales. Il a été démontré (Lassiter, 2003) que la forte volatilité du Re explique la différence importante entre les teneurs en Re des MORB qui sont mis en place dans un contexte sous-marin, et celles des îles océaniques qui perdent du Re lors de leur éruption subaérienne. Pourtant l'éventuelle perte du Re lors du dégazage des MORB n'a jamais été étudiée. Nous projetons d'investiguer cette possibilité en analysant une série de MORB de la ride sud-est indienne dont les taux de dégazage sont déjà bien établis à partir des analyses des gaz rares (Burnard *et al.*, 2002, 2004). Les résultats serviront à clarifier le comportement du Re lors de la fusion partielle du manteau, ainsi que le flux éventuel du Re vers l'océan lors du dégazage des magmas basaltiques.

TRANSFERTS MANTEAU-CROÛTE ET FLUX DANS LA LITHOSPHERE

Ce sous-thème concerne l'étude des transferts de fluides et de magmas au sein de la lithosphère mais aussi entre lithosphère et manteau supérieur, en contexte de convergence. Les questions majeures identifiées dans les différents projets sont :

(i) quels sont les transferts de fluides intervenant dans une zone de subduction océanique actuelle et leurs interactions avec la structuration, la fracturation et la sismogénèse de cette zone?

(ii) quels sont les transferts de magmas se produisant au cours de l'évolution d'une marge active sur plusieurs centaines de millions d'années et comment peut-on s'en servir pour reconstituer la déformation de la plaque chevauchante?

(iii) comment se font les transferts d'eau dans la lithosphère ; est-il possible de déterminer la composition et l'âge des flux et le comportement de l'eau lors des processus magmatiques et métamorphiques ?

(iv) quelle est la mobilité à différentes échelles des REE et des HFSE lors du métamorphisme associé à la circulation d'une phase fluide ?

Chercheurs : Sylvain Bourlange, Françoise Chalot-Prat, Stéphanie Duchêne, Etienne Deloule, Béatrice Luais

Collaborations : P. Henry (Aix-en-Provence), S. Lallemand et L. Louis (Cergy-Pontoise), T. McCann (Germany), A. Saintot (Trondheim), R. Stephenson et J. Wijbrans (Amsterdam), V. Starostenko (Kiev), A. Seghedi (Roumanie), N. Pravikova (Moscow), N. Metrich (CEA Saclay), C. Wagner (UPMC), QunKe Xia (Hefei), XiaoZhi Yang (USTC), F. Brunet (ENS Paris), D. Marquer et P. Goncalves (Besançon)

Doctorants : A.S. Bouvier, C. Martin

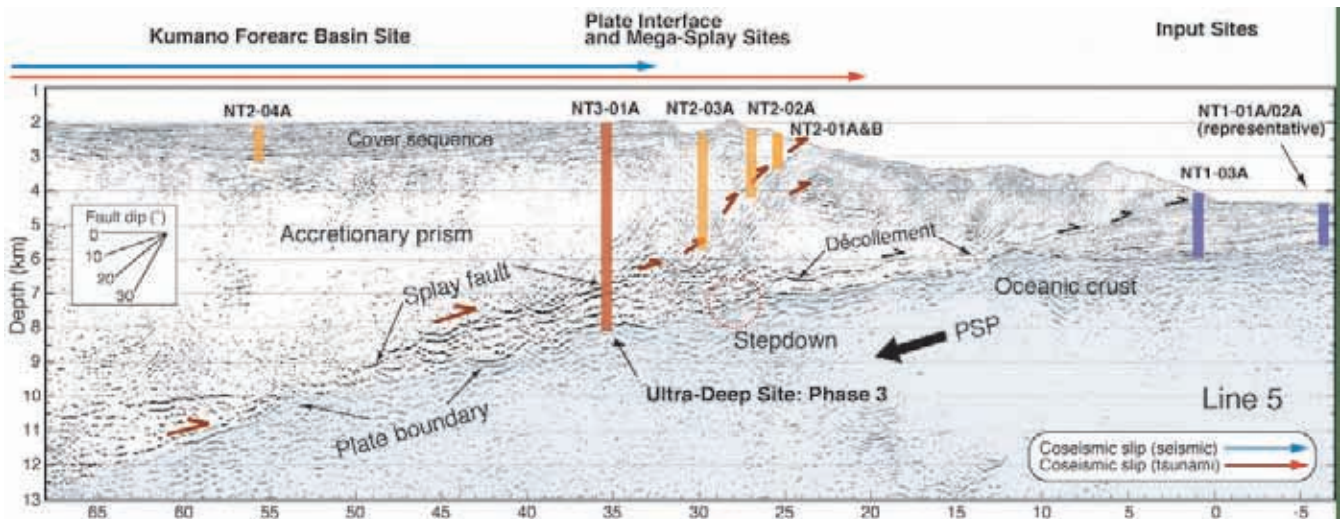
Financement : NanTroSEIZE (3F, INSU), demande de financement sur appel d'offre 2008 Eurocores Programme/TOPO Europe, Financement 3f (2007-2008), ANR Antilles et Mime et projet de coopération franco-chinois (PRA)

TRANSFERTS DE FLUIDES, FRACTURATION ET SISMOGÈNESE DANS LES ZONES DE SUBDUCTION

La zone de subduction de Nankai au Japon est une des zones sismiques les plus actives au monde et une des zones de subduction les mieux étudiées. Les derniers grands séismes ayant affectés cette zone sont ceux de Tonankai (M=8.1) en 1944 et de Nankaido (M=8.3) en 1946. Cette zone de subduction est le chantier d'étude du programme international NanTroSEIZE dans

le cadre du programme IODP (Fig.MFP2, ci-dessous). Il s'agit d'un projet d'étude intégrée de la zone de subduction, incluant le forage, l'échantillonnage et la mise en place d'un observatoire instrumental de la zone sismogénique de la limite de plaque. Les enjeux scientifiques sont de comprendre les mécanismes à l'origine des structures géologiques de cette limite de

Fig.MFP2. Coupe sismique et localisation des sites de forage du programme IODP Nantroseize de forages multiples de la zone de subduction de Nankai. Les grandes failles de cette zone de subduction et la zone sismogénique vont ainsi faire l'objet de carottage, de diaggraphie et d'instrumentation dans les 5 années à venir.



plaque ainsi que leur évolution temporelle, en rapport avec le déclenchement des tremblements de terre. Dans le cadre de la participation au projet NanTroSEIZE, nous envisageons d'étudier plus précisément le rôle des fluides en essayant de mieux identifier les interactions entre les transferts de fluides, fracturation et sismogénèse. Nous proposons de réaliser une étude fine de

la structure et des modes de déformations des matériaux affectés par la zone de subduction, ainsi qu'une caractérisation des surpressions de fluides en présence dans le système ainsi que des flux en présence. L'objectif étant de mieux cerner comment déformations et circulations de fluides agissent de concert au cours du cycle sismique dans cette zone sismogénique.

MAGMATISME ET ÉVOLUTION MORPHO-TECTONIQUE À LONG TERME D'UNE MARGE ACTIVE

La marge méridionale de la Plate-Forme Est-Européenne et la région de la Mer Noire ont constitué pendant 300 Ma (Dévonien-Carbonifère) le front d'une zone de convergence de plaques par subduction vers le Nord de la Téthys. L'objectif de ce projet géologique et géophysique est d'élucider le mode de fonctionnement d'une marge active sur une durée de plusieurs centaines de millions d'années : a-t-elle évolué, comme classiquement invoqué, par accréation continue de terrains en front de marge et chevauchements successifs vers le sud des panneaux subductés, ou plutôt par ouvertures et fermetures répétées de bassins d'arrière-arc à l'arrière d'une zone de subduction océanique majeure et pérenne ? Cette dernière hypothèse suppose la réactivation tectonique à

de multiples reprises de sutures lithosphériques, laquelle s'est accompagnée de nombreux changements topographiques et effets associés (érosion et climats). Les magmas produits, crustaux ou mantelliques, intrusifs ou extrusifs, tout au long de cette évolution sont indicateurs de la composition des zones sollicitées dans la lithosphère continentale ou le manteau sous-jacent mais aussi du comportement rhéologique des niveaux traversés lors de leur mise en place. Intégrées à l'étude tectono-sédimentaire des bassins, les analyses géochimique et isotopique des roches magmatiques et leur datation constituent un excellent traceur de l'évolution de la déformation de la plaque chevauchante.

FLUX D'ÉLÉMENTS ET COMPORTEMENT DE L'EAU DANS LA LITHOSPHERE CONTINENTALE

L'étude du comportement de l'eau à l'interface manteau-croûte, de sa distribution entre les différentes phases minérales lors des processus magmatiques ou métamorphiques est indispensable pour définir les flux dans la lithosphère. Pour ce faire, il faut d'une part définir les quantités d'éléments susceptibles d'avoir bougé, en mesurant les teneurs en eau, éléments légers et éléments traces, ainsi que leur composition isotopique pour tracer les sources et/ou les processus, dans des échantillons représentatifs des processus à l'interface. Il faut, d'autre part, dater les échantillons et si possible les processus pour pouvoir intégrer dans le temps

les transferts entre réservoirs. Pour réaliser ce projet, nous voulons développer les datations Rb-Sr et K-Ca *in-situ* par microsonde ionique, en faisant l'acquisition d'une microsonde ionique à très haute résolution de masse (> 30 000), qui pourra être installée au CRPG en 2009-2010. Les échantillons destinés à l'étude sont des xénolithes et/ou xénocristaux de granulites de la croûte inférieure et de péridotites du manteau supérieur. Les mesures portent sur les teneurs en eau et éléments traces et les compositions isotopiques sur des minéraux nominalelement anhydres par microsonde ionique et des inclusions vitreuses de xénocristaux du manteau.

MOBILITÉ DES REE ET DES HFSE PAR LES FLUIDES

Le but de cette étude est de mettre en évidence la mobilité à différentes échelles des REE et des HFSE lors du métamorphisme. Est-ce que la mobilité différentielle lors du métamorphisme en présence de fluides carbonatés ou salins peut induire des découplages isotopiques des systèmes Nd et Hf depuis l'échelle de l'affleurement jusqu'à l'échelle crustale ? De même cette mobilité à l'échelle de l'échantillon contrôle-t-elle le fonctionnement des chronomètres Sm-Nd et Lu-Hf et donc la signification relative des âges

métamorphiques sur minéraux séparés ?

Ce projet s'appuie sur deux exemples : métamorphisme HP/BT en contexte de subduction continentale des Calédonides de Norvège et skarn du Quérigut (Pyrénées) pour étudier le transfert des REE en milieu carbonaté. Les approches utilisées sont la réalisation de bilans élémentaires et isotopiques lors du métamorphisme et l'étude expérimentale de la solubilité des REE et des HFSE en conditions métamorphiques.

TRAÇAGE ISOTOPIQUE ET DATATION DES MINÉRALISATIONS

Toute concentration minérale présente dans la lithosphère une anomalie géochimique susceptible d'être exploitée rationnellement. La recherche fondamentale sur les ressources minérales a donc une importance capitale car elle permet d'établir des modèles prédictifs qui ciblent la prospection et l'orientation de l'inventaire minéral. Des enjeux de société et des défis scientifiques majeurs apparaissent et s'agissant des métaux associés aux gisements magmatiques s.l., des questions fondamentales peuvent être abordées par l'étude des compositions isotopiques des minéralisations. Ces questions concernent à la fois la datation et la détermination des sources des gisements. La datation peut être effectuée soit sur les minéralisations

elles-mêmes par la méthode Re/Os, soit sur les minéraux accessoires piégés dans les métaux ou les minéraux porteurs par les méthodes U/Pb, Sm/Nd. Le traçage isotopique des métaux et éventuellement des inclusions magmatiques par les isotopes stables (O-H-S) ainsi que par les isotopes radiogéniques (Os, Pb) permettent de définir les sources et les affiliations magmatiques des minéralisations. Il est notamment possible d'estimer les apports relatifs des sources mantelliques et crustales.

L'approche du CRPG pour aborder ces questions est très spécifique, la recherche s'appuyant sur les équipements du centre, notamment la sonde ionique et les laboratoires d'isotopes stables et radiogéniques qui permettent d'apporter des éléments de réponse aux travaux de terrain réalisés par ses chercheurs. Le sous-thème «Traçage isotopique et datation des minéralisations» mérite pleinement son affichage dans le thème Magma et Fluides profonds» dans le cadre du quadriennal 2008-2011, dans la mesure où les sujets abordés reposent sur les transferts de magmas et leur interaction avec l'encaissant. Il se compose de deux chantiers : (i) un chantier « métaux » en liaison étroite avec les processus magmatiques et (ii) un chantier « gemmes » plus orienté vers les interactions entre magma et croûte continentale.

Chercheurs : Pierre Barbey, Guillaume Caumon, Alain Cheilletz, Etienne Deloule, Gaston Giuliani, Daniel Ohnenstetter, Maryse Ohnenstetter, Laurie Reisberg, Jean-Jacques Royer

Collaborations : D. Bois et M. Jébrak (Canada), D. Gasquet (Chambéry), E. Gonzalez, G. Levresse (Mexique), A. Mouttaqi (Maroc), J.L. Paquette (Clermont) M.C. Boiron, A-S. André, J. Leroy, J. Dubessy et M. Cuney (G2R), N. Arndt (Grenoble), D. Rakotomanana (Madagascar), F. Poitrasson (Toulouse), A.E. Fallick (Glasgow), M. Rakotondrazafy (Antananarivo)

Doctorants et stagiaires : O. Rabeau (cotutelle INPL/UQAM-Montréal), S. Rakotosamizanany (Université d'Antananarivo, IRD, CRPG/CNRS), A. Ratefiarimino (stagiaire PGRM Madagascar)

Financement : DIVEX (Réseau pour la diversification de l'exploration minérale au Québec); Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune du Québec, accord de coopération scientifique avec l'ONHYM, allocation de thèse, IRD, SUERC, ANR blanc pour 2008 ou autre spécifique sur l'Afrique.

LES MÉTAUX

Identification des mécanismes de contrôle des flux de matière dans la lithosphère continentale au moyen de l'étude des concentrations métallifères

Nous nous intéressons aux gisements de métaux précieux (Ag-Au) sur trois exemples : Anti-Atlas marocain, ceinture centrale Mexicaine et Abitibi. Dans le premier cas l'objectif est de déterminer le rôle des multiples réservoirs de la lithosphère continentale à l'origine du stock métal concentré, dans le cadre de l'évolution tardi-panafricaine de la marge continentale Anti-atlasique (Gasquet *et al.*, 2005). Nos travaux ont permis d'établir l'âge et la source de la minéralisation (Cheilletz *et al.*, 2002; Levresse *et al.*, 2003). Au Mexique, nos premiers résultats montrent pour la première fois l'implication d'un magmatisme de type adakitique dans la genèse

des minéralisations Au-Fe de type skarn. Notre objectif est notamment la ré-interprétation des modèles génétiques de certains gisements de type VMS (Francisco y Madero) ou Skarn (Charcas). L'établissement de nouveaux modèles métallogéniques permet de produire, en partenariat avec les entreprises concernées, des guides d'exploration extrêmement efficaces aux échelles tactiques et stratégiques. Enfin, sur l'exemple de la ceinture volcano-sédimentaire archéenne de l'Abitibi, notre objectif est de quantifier les transferts à partir de la modélisation géométrique et numérique des corps minéralisés.

Datation, traçage des sources et contexte des minéralisations de la bordure NW du craton Ouest africain (Sahara marocain)

Le contexte géologique du sud marocain consiste en un domaine archéen, prolongation occidentale de la Dorsale Reguibat, et un domaine néoproterozoïque repris à l'Hercynien (Mauritanides). De nature essentiellement calco-alcaline/sub-alcaline pour la partie panafricaine, le magmatisme s'accompagne de minéralisations de typologie variées : stratiformes VMS, épithermal, remplacement (Barodi *et al.*, 2002 ; Levresse *et al.*, 2004). Les premières phases d'exploration du Sahara marocain ont mis en évidence de nouvelles cibles, notamment : magmatisme alcalin (carbonatites), magmatisme anorthositique

(gabbros, anorthosites). Il apparaît donc un enjeu économique en raison des ressources potentiellement associées à ces roches (Cu, Au, Ti, REE, Nb). En amont de cet intérêt économique se situent deux enjeux scientifiques : (i) la genèse et l'évolution des minéralisations dans les contextes polyphasés (datation, traçage des sources, etc.), et (ii) la signification de ces différents magmatismes sur l'évolution géodynamique de la bordure NW du craton ouest-africain qui reste à ce jour mal connue. L'expertise que nous avons acquise, d'une part, sur la datation des zircons hydrothermaux (Pelletier *et al.*, 2007) et

la méthode Ar et, d'autre part, sur le Panafricain et Hercynien de l'Anti-Atlas marocain (Gasquet *et al.*, 2005) et sur l'Archéen et le Paléoprotérozoïque de la Dorsale Reguibat (Barbey 1974, 1975 ;

Cuney *et al.*, 1975 ; Lahondère *et al.*, 2004), nous permettent d'aborder ce sujet dans les meilleures conditions.

Le système Re-Os : datation et traçage des sources des minéralisations

Le couple radiogénique Re-Os est d'un intérêt particulier dans les investigations métallogéniques car il est le seul système isotopique qui permet la datation de la minéralisation elle-même, plutôt que celle des phases silicatées associées. En outre, en raison du contraste important de la composition isotopique de l'osmium entre la croûte continentale et le manteau, ce système est également un excellent traceur pour l'identification de la source des métaux dans les gisements. Au CRPG, les analyses Re-Os ont déjà été exploitées pour contraindre la source des métaux dans le

gisement géant d'argent d'Imiter, Maroc (Levresse *et al.*, 2004), et pour dater la minéralisation à Cuivre et or de l'intrusion de Bolcana, Roumanie (Cardon *et al.*, soumis). Grâce à sa souplesse, ce système sera un composant important de nombreuses études métallogéniques en cours ou prévues dans les années à venir, par exemple sur des projets concernant les gisements d'or et de chrome de Madagascar, et les minéralisations aurifères hercynienne en Europe. Ces études seront menées en collaboration étroite avec des chercheurs du G2R.

Transfert et dépôt des éléments du groupe du platine (EGP) et du chrome dans les chambres magmatiques

Notre objectif est d'aborder l'origine des minéralisations en EGP sur les exemples du Bushveld et Andriamena. Les études géochimiques récentes entreprises dans le complexe du Bushveld invoquent l'injection d'un magma spécifique, contaminé par la croûte continentale, et porteur de la minéralisation platinifère, à l'origine du Merensky Reef (Arndt *et al.*, 2005). Cela contraste avec les précédents modèles qui envisageaient le mélange du magma résident après le dépôt de la plupart des ultramafites avec un autre magma (soit de composition semblable au magma parent des ultramafites du Bushveld, soit très évolué et issu de la cristallisation des ultramafites, soit alumineux, contaminé par la croûte et parent des leucogabbros de la zone principale reposant au-dessus du Merensky Reef). Les travaux préliminaires mettent en évidence un contraste lithologique et géochimique entre les assemblages interstitiels et les inclusions magmatiques associés à la minéralisation d'une part, et les phénocristaux et minéraux poecilites d'autre part, ces derniers montrant également des évolutions cryptiques contrastées en fonction de leur position stratigraphique dans l'unité. Tout ceci conforterait l'hypothèse de la

présence de magmas distincts lors du dépôt de la minéralisation platinifère. Notre objectif est donc de caractériser l'origine des assemblages pétrographiques (par différentes approches dont la sonde ionique) d'une section de l'unité du Merensky Reef, à Rustenburg, afin de décrypter la présence et l'origine de différents magmas, leur mode de mise en place et évolution dans une zone transitoire clef de la chambre magmatique du Bushveld.

Par ailleurs, le lien entre minéralisation chromifère et minéralisation en EGP existe aussi, d'une manière plus générale, dans les ophiolites et les complexes alaskéens. A Madagascar, des minéralisations platinifères ont été découvertes dans des intrusions supposées néoprotérozoïques, dont l'origine par rapport aux chromitites d'Andriamena, réputées archéennes, est problématique. Les études de terrain et pétrographiques sur les chromitites d'Andriamena montrant des variations significatives de la composition des chromitites, notre approche sera d'utiliser les méthodes Re/Os et Sm/Nd pour dater ces minéralisations et leur encaissant, déterminer l'origine des magmas parents et le type de complexe porteur.

LES GEMMES

Les gisements de corindons gemmes associés aux basaltes alcalins

L'objectif de la recherche est l'étude des saphirs et des rubis associés aux environnements basaltiques notamment de Madagascar, Tanzanie, Cameroun, Chine et Australie. Il s'agit d'étudier soit les gisements primaires de rubis et de saphirs associés aux basaltes (Fig.MFP3, page suivante), soit les placers liés au démantèlement de ces derniers. L'étude des caractéristiques chimiques,

minéralogiques et isotopiques de ces corindons ainsi que celles des basaltes va permettre de contribuer au débat international sur l'origine de ces cristaux (mécanismes de formation métamorphique, magmatique ou hybride). L'étude pétro-géochimique des xénolites et enclaves associés aux basaltes vont nous apporter des informations primordiales sur la nature de la

croûte profonde et du manteau infra-continental au Cénozoïque. Le couplage des données pétrographiques, géochimiques et radiométriques permettra de proposer un ou des modèle(s) de formation pour ces gisements. Par ailleurs, l'étude gemmologique et isotopique des différents types de saphirs et de

rubis nous permettra d'établir une carte d'identité minéralogique et isotopique pour chaque gisement avec une application certaine à la certification commerciale. Les chantiers sont répartis sur les différents continents: Afrique (Cameroun, Tanzanie, Nigéria, Madagascar), Asie (Chine, Vietnam, Australie), Europe (France), Amérique du sud (Colombie), Amérique du Nord (Etats-Unis)



Fig.MFP3. Xénocrystal de saphir bleu inclus dans un basalte alcalin du Changle (Chine). échelle : 1 cm de long

