

Dans les revues que nous avons reçues

Le numéro de décembre de

Géochronique :

« *Regards croisés sur le métamorphisme* ».

Dominique Rossier,

animateur de la Commission de volcanisme de la Saga.

Plusieurs d'entre nous connaissent déjà et apprécient cette revue de la Société géologique de France (SGF), dont la présentation a été grandement embellie ces dernières années. Bien que destinée en premier lieu à la communauté des géologues, elle a l'avantage d'apporter aux amateurs non professionnels une information de haute qualité en général sur un grand thème géologique. Elle est rédigée par des spécialistes, mais présentée de façon accessible et remarquablement vivante (édition en partenariat avec le BRGM).

C'est encore le cas de la dernière livraison du n° 136 (décembre 2015), dont le titre est : « *Regards croisés sur le métamorphisme* ». Voilà un sujet qui n'a pas toujours la réputation de grande facilité ! Pourtant quelle richesse dans ce numéro, qui certes ne prétend pas faire le tour de la question, mais qui éclaire sur quelques orientations récentes d'une discipline importante de la géologie. Après avoir longtemps hésité, je me suis risqué à résumer un, puis deux, puis... pris au jeu, tous les articles. La lecture de ces courts articles très denses n'est pas toujours facile, mais elle doit enrichir notre culture générale géologique. Ils sont tous bien illustrés et documentés. Un excellent lexique, en fin de numéro, apporte les éclaircissements nécessaires.

Le « dossier » de *Géochronique* a été coordonné par Christian Nicollet (univ. Blaise Pascal-CNRS, Clermont-Ferrand), bien connu des membres de la SAGA pour ses publications et son site. Le coordinateur a fait appel à un panel étendu et international de spécialistes. Le dossier est organisé en trois parties et aborde successivement les thèmes suivants : 1) *les limites du métamorphisme*, 2) *la quantification* dans les méthodes de mesure et de modélisation, enfin 3) *le fluide*, coquettement paré du nom de « *Arlésienne du métamorphisme* ».

Il n'est pas possible d'analyser en détail tous les articles. Aussi mon choix a été très personnel et s'est porté sur un petit nombre de thèmes, que nous avons l'occasion d'aborder à la Commission du volcanisme, soit lors des conférences ou exposés de nos réunions, soit à l'occasion de nos grands voyages d'étude annuels, et enfin dans nos séminaires de pétrographie. Pour tout le reste, j'ai tenté une synthèse, qui a été facilitée par l'importance donnée dans ce numéro au

métamorphisme du *cycle de la lithosphère océanique*, de la formation des ophiolites jusqu'à la subduction.

Premier thème,

« *les limites du métamorphisme* ».

Après un court article faisant un rappel bien utile sur la « *Transition diagenèse- métamorphisme* » par M. Dubois et F. Bourdelle (lab. de génie et géo-environnement, univ. Lille), nous avons retenu, pour le développer, celui sur la « *Fusion partielle, extraction des liquides et différenciation de la croûte continentale : l'exemple du Massif central français (MCF)* », par V. Gardien (univ. de Lyon 1).

1. Une histoire tectonique et métamorphique de la naissance du Massif central paléozoïque.

Tous ceux, nombreux, qui fréquentent cette vaste région de France savent la difficulté de se faire une idée synthétique de son histoire géologique avant et pendant le cycle varisque (hercynien). L'auteur rappelle d'abord les grandes lignes de la structuration de la croûte sous le MCF en deux unités métamorphiques principales. La plus ancienne, l'unité supérieure des gneiss contient le *complexe leptyno-amphibolique*, témoin important de l'existence au Paléozoïque d'un vaste océan médio-européen, avec une croûte océanique ayant fait subduction juste avant le début du cycle varisque (415 Ma). Plusieurs d'entre nous ont eu l'occasion de découvrir les fascinantes reliques de haute pression de cet épisode de subduction, en échantillonnant les précieuses *éclogites* et *granulites* sur les deux bordures occidentale et orientale du MCF.

La seconde unité, l'unité inférieure des gneiss, est celle issue de la marge nord du Gondwana, entrée en collision avec l'Armorica et la Laurussia, entre la fin du Dévonien et le Carbonifère, et produisant la fermeture du domaine océanique. Or, non seulement ces deux unités se sont chevauchées lors de la « supercollision » continentale varisque, l'unité inférieure passant par dessous l'unité supérieure, mais elles sont également toutes deux abondamment pourvues de *migmatites* et de *granites d'anatexie*. Et bien sûr, ce sont ces structures qui nous intéressent au plus haut point car nous les rencontrons au cours de nos voya-

ges au Massif Central, comme socle des unités volcaniques que nous visitons. Elles témoignent de plusieurs épisodes de fusion partielle de la base de la croûte continentale, accompagnant le déroulement de tectonique varisque.

C'est à ce point que l'article prend tout son intérêt de synthèse, et toute son utilité pour nous, car il parvient à retracer l'histoire des migmatisations et fusions de la croûte du MCF, et à en différencier les principaux stades. Auparavant, il rappelle le diagramme *pression-température* (P/T) des réactions de transformation des minéraux et de fusion hydratée de leurs assemblages, qui est la charte et l'outil de base pour la compréhension du métamorphisme et de l'anatexie; avec ses deux cas principaux : celui des métasédiments (exemple : les métapélites), et celui des metabasites (exemple : les amphibolites).

L'intérêt majeur de la présentation est que, sur le même diagramme P/T, l'auteur reporte les événements successifs d'injection de granites dans la croûte continentale, qui se sont produits en même temps que l'apparition des migmatites. Le diagramme de base est classique, mais la présentation qu'en fait l'auteur, malgré sa complexité, mérite que le lecteur intéressé s'y reporte pour ses travaux de pétrographie. Au cœur du raisonnement, il y a la prise en compte des réactions métamorphiques et, au premier plan, bien sûr, celles de la production de liquides silicatés, impliquant des minéraux hydroxylés comme les micas et les amphiboles.

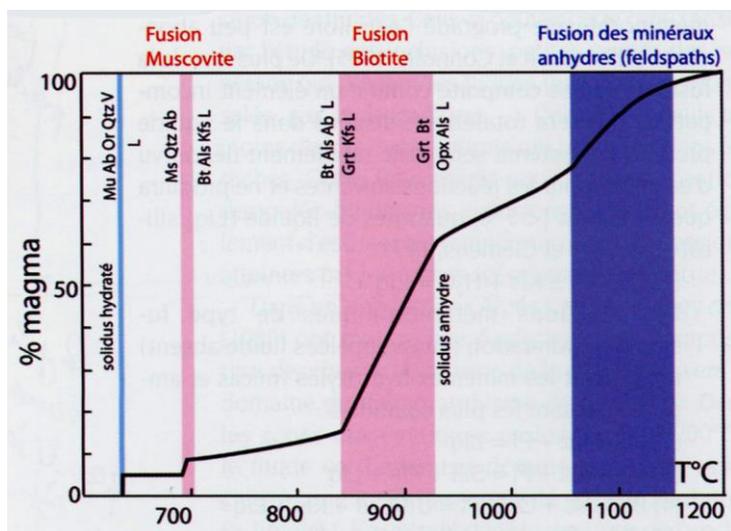


Figure 1 (figure 1-6 du texte). Quantité de liquide produit à 8 kbar, au cours des différentes réactions de fusion hydratée (solidus) et de fusion-déshydratation (aussi appelées réactions « fluide absent ») de la muscovite et de la biotite. D'après les travaux expérimentaux de Vielzeuf et Holloway (1988).

Ainsi de la réaction courante, à la température relativement modeste de 700 °C :



Toutefois la production véritablement efficace de liquide se produit dans les métapélites (roches dites « fertiles » à ce titre !), à plus haute température, par la déshydratation de la *biotite*, comme le montre le schéma (figure 1) établi par Vielzeuf et Holloway (1988).

L'auteur de l'article expose alors les trois principaux « événements migmatitiques » (dénotés « Mig I » à « Mig III ») avec stades de fusion et d'intrusion de granitoïdes dans le MCF. Tous sont rapportés en termes de localisations géographiques et de stades successifs de la collision. Pour les détails, le lecteur se reportera à l'article ; nous voulons seulement insister sur l'importance du lien établi chaque fois avec le diagramme de la figure 1.

Prenons l'exemple de l'« événement migmatitique » n° 2 (*Mig. II*). Cette seconde étape, très présente dans

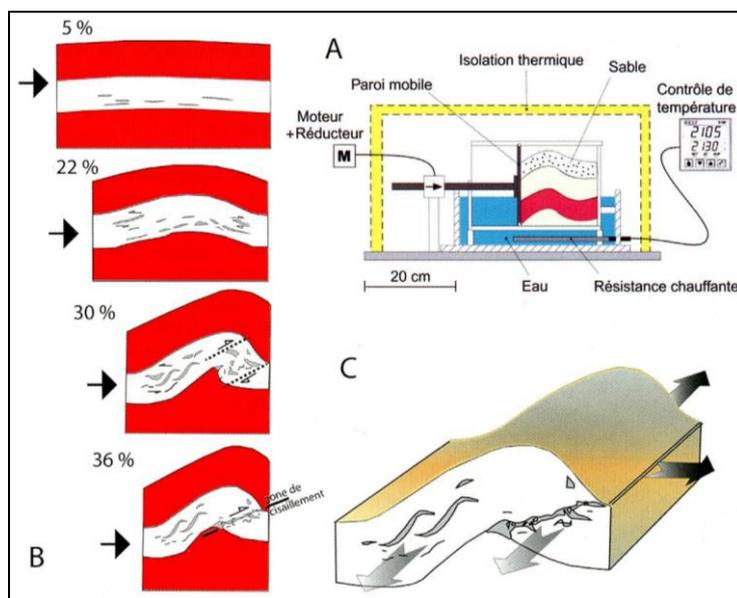


Figure 2 (figure 1-9 du texte). Modélisation de la ségrégation des magmas assistée par la déformation.

A. Schéma du montage expérimental. La paroi mobile se déplace à la vitesse de 2,45 mm/h et déforme le modèle multicouche. Le modèle est chauffé par un bain-marie à température constante.

B. Évolution de la déformation et localisation du liquide au cours du raccourcissement. Pour des taux de 5 % à 22 % de raccourcissement, le liquide de fusion se localise dans des veines dans des plans horizontaux parallèles aux plans d'anisotropie (représentant la foliation préexistante). Un pli asymétrique se forme à 30 % de raccourcissement et son flanc inverse évolue en zone de cisaillement où s'accumule le liquide de fusion.

À 36 % de raccourcissement, le liquide de fusion forme un filon orienté parallèlement au plan axial du pli.

C. Modèle en trois dimensions montrant l'expulsion latérale et vers le haut du liquide de fusion.

D'après Barraud (2001) et Barraud et al., (2001).

le Limousin, le Livradois et dans les Cévennes, touche l'unité inférieure des gneiss, issue du Gondwana. Ses conditions de haute température (720 à 820 °C) et de pressions moyennes (5 à 6 kbar) engendrent la déstabilisation de la *biotite*, ce qui entraîne une forte production de liquides granitiques, qui viennent s'infiltrer et cristalliser dans les *paragneiss* et les *leucocomes* des *orthogneiss* du métamorphisme régional (voir le lexique en fin du numéro de *Géochronique*).

La dernière partie de l'article, *ségrégation et migration des liquides de fusion*, est plus technique. Cependant, elle apporte des informations précieuses pour le pétrographe soucieux de détecter sur un affleurement ou dans ses échantillons les premiers signes de la migmatitisation. Surtout, elle éclaire sur le rôle décisif de la tectonique et des zones de cisaillement dans la mobilisation et le déplacement des liquides résultant de la fusion partielle.

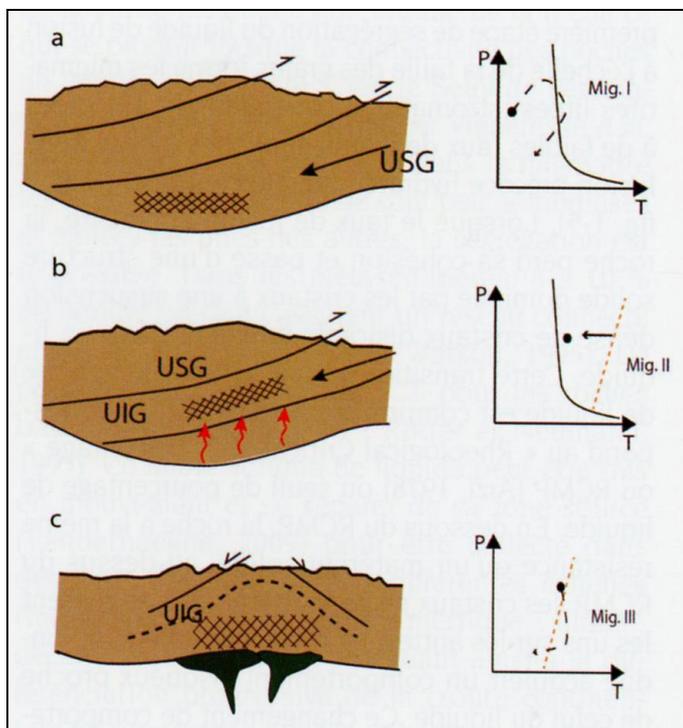


Figure 3 (figure 1-10 du texte). Évolution tectonique schématisée du Massif central français entre le Dévonien (Mig. I) et le Carbonifère supérieur (Mig. II et III). La zone hachurée représente la zone de fusion dans la croûte, le placage de magmas basiques est représenté en vert foncé, les flèches rouges indiquent les transferts des fluides des unités supérieures de l'autochtone relatif lors de l'enfouissement sous l'unité inférieure des gneiss durant la collision. Sur les diagrammes P-T, on a reporté la courbe de fusion des granites en conditions hydratées (trait noir plein) et le solidus « fluide absent » (trait orangé pointillé). Pour (a) et (c), la courbe noire en pointillé représente le trajet PT de l'unité fondue. Pour (b), la flèche en trait plein représente le déplacement de la courbe du solidus (pointillé orange) vers le solidus hydraté lorsque l'unité inférieure des gneiss est hydratée (d'après Caron et al., 2003).

La figure 2 est illustrative des analogies et des pistes d'explication que l'on peut obtenir avec des silicones, sur un simple banc expérimental, construit avec un moteur et une résistance chauffante !

L'auteur peut alors conclure par une synthèse de l'évolution tectonique du MCF avant et pendant le cycle varisque : c'est le schéma de la figure 3. Nous reproduisons intégralement ci-dessous le paragraphe de conclusion de l'auteur.

« [...] Entre le Dévonien moyen à supérieur et le Carbonifère supérieur, la croûte continentale varisque a été impliquée dans des contextes géodynamiques favorables au développement de plusieurs événements de fusion partielle. Cela a débuté par la subduction continentale qui a entraîné l'unité supérieure en profondeur (figure 4-1). L'augmentation de température consécutive à l'enfouissement a provoqué la fusion partielle limitée (Mig I) de l'unité vers 385 Ma. Dans ce contexte de fin de subduction océanique et de début de collision continentale, la plaque chevauchante dans laquelle s'intègre l'unité supérieure est maintenue dans un régime thermique élevé par l'arrivée plus tard, entre 370 et 340 Ma, de granitoïdes alcalins à peralumineux. Au cours de cette période, le front de déformation progresse vers le sud, entraînant le charriage de l'unité supérieure sur la marge amincie du Gondwana (l'unité inférieure) et l'autochtone relatif (figure 4-b). L'unité inférieure subit alors un premier stade de fusion partielle hydratée (Mig II), les fluides pouvant venir de la déshydratation des sédiments de l'autochtone relatif. Le régime thermique est amplifié par la désintégration des éléments radioactifs abondants dans ces unités crustales empilées. Dans ce contexte thermique très chaud, les forces tectoniques s'inversent et passent de la collision à l'extension. La base de la croûte continentale chaude remonte avec ses isothermes, provoquant une fusion généralisée des séries métamorphiques (Mig III) par décompression adiabatique (figure 4-c).

Là encore, on assiste à une surchauffe de la croûte par l'injection de magmas basiques issus de la fusion du manteau lithosphérique qui remonte, soit par rupture, soit par retrait de la plaque plongeante. Ce stade est associé à la formation de grandes quantités de migmatites et granites d'origine crustale qui vont migrer en croûte supérieure (différentiation crustale). »

2. Le premier thème, *les limites du métamorphisme*, se termine par le vaste domaine du métamorphisme des hautes et très hautes pressions, avec en premier, un article sur l'historique des recherches, intitulé : « **Le métamorphisme de (ultra) haute pression : deux siècles de débat** », par G. Godard (équipe GAP, IPGP, univ. Paris Diderot).

Les éclogites, si recherchées par certains membres de la SAGA, en sont les vedettes, en particulier lors qu'elles ont subi les ultra hautes pressions, domaine qui reste encore bien énigmatique. Sur le plan historique, l'article montre l'intérêt (« *roches de choix* » ou « *sélectives* », en suivant le sens étymologique donné par leur inventeur, l'Abbé René-Just Haüy) de ces roches extraordinaires, dans l'approche inductive de la pétrologie endogène.

Le premier thème se termine par un article plus spéculatif, de C. Nicollet lui-même, sur le thème « *Métamorphismes extrêmes et refroidissement de la Terre* ».

Partant de l'idée que, depuis l'Archéen, les modalités de subduction ont dû radicalement changer (on parle de *gradient de subduction*), passant d'un mode « chaud », au mode de subduction froide que nous connaissons relativement bien, C. Nicollet pose la question de l'âge de cette transition, de sa progressivité et de la possibilité même de la détecter dans les très rares vestiges d'*éclogites* précambriennes que nous connaissons.

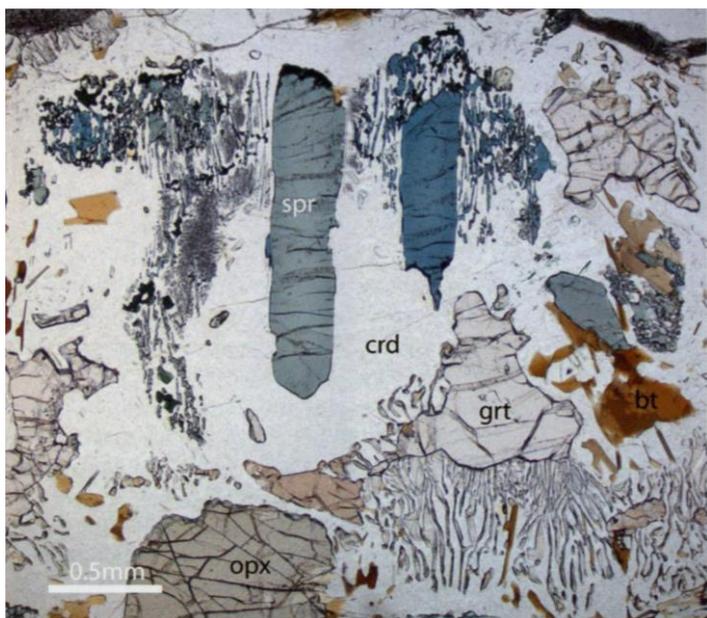


Figure 4 (figure 1-24 du texte). Granulite d'ultra-haute température du complexe de Gruf, dans les Alpes. Au voisinage des gros cristaux bleu-vert de saphirine, la cordiérite contient des symplectites complexes à saphirine+spinelle+sillimanite. En bas de la photo, le grenat se déstabilise en orthopyroxène+cordiérite.

Une autre piste est offerte par les *granulites* d'ultra-hautes températures, telles que celles du complexe de Gruf dans les Alpes, et qui conduisent aux paragenèses si spectaculaires que l'auteur a retenues pour le magnifique cliché de la dernière page de couverture de *Géochronique*. Mais là encore, le lien avec les

mécanismes primitifs de refroidissement de la Terre et de formation de la croûte ne sont pas encore établis. Pour le plaisir de lecteur, nous reproduisons (figure 4) un cliché en LPA (lumière polarisée analysée) d'une granulite du Gruf.

Deuxième thème, la « quantification »

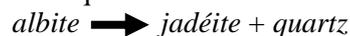
Il s'agit là d'un thème plutôt réservé aux spécialistes, si bien que nous en proposons un survol, utile pour notre connaissance générale et notre prise de conscience des progrès les plus récents en matière de géophysique. Certains résultats obtenus sont vraiment surprenants !

1. Cependant, l'article de T. Hammouda (lab. Magmas et volcans, univ. Blaise Pascal, Clermont-Ferrand), intitulé « *Les apports de l'expérimentation à la modélisation des processus métamorphiques* », constitue une bonne introduction au sujet, et peut être lu et compris en totalité par les membres de la SAGA. Toutes les notions de base du métamorphisme sont rappelées, comme celles des minéraux index et des faciès (Eskola). À juste raison l'auteur rappelle le rôle pionnier de Daubrée (1857) dans l'utilisation des techniques expérimentales, consistant à soumettre les minéraux à l'action de la température et de la pression dans un autoclave. C'est ce que les anglo-saxons ont appelé – pour lui donner un formidable développement – la méthode « *cook and look* ». Les mesures sont ensuite à interpréter par les lois de la thermodynamique, ce qui a nécessité de bâtir au fil du XX^e siècle un immense corpus de propriétés physiques de tous les minéraux : c'est la *géothermobarométrie*.

Suit une description sommaire des différents types de montages expérimentaux permettant la mise en pression des minéraux et de leurs assemblages à température donnée. Avec l'exemple fameux des expériences « piston-cylindre » de très haute pression, permettant de mettre en évidence la transition *quartz-coésite*. Qui n'a pas rêvé d'aller chercher et récolter la coésite dans les quartzites de Dora Maria dans les Alpes ?

À noter que, dans ce cas d'école, c'est la synthèse en laboratoire qui a précédé la découverte sur le terrain !

Un autre exemple, illustré sur une pleine page, est donné par la classique transition



à pression supérieure à 15 kbar (et au-dessus de 600 °C). C'est une réaction importante, comme étant un des rares baromètres pour les roches basiques. Nous sommes plusieurs à la SAGA à avoir récolté, et analysé en lame mince, les magnifiques éclogites « fraîches » du Bas Limousin et celles de Monte

Mucrone, dans les Alpes. Dans ce cas classique, la jadéite (pyroxène aluminosodique) est mise en solution solide dans le *diopside* (pyroxène calcique), pour donner la belle *omphacite* reconnaissable à sa couleur vert émeraude (figures 5a et 5b). L'omphacite, formée dans des conditions de haute température et de haute pression, est dans un état métastable, et n'est conservée que dans des conditions d'exhumation rapide, et en l'absence de déformations notables. Dans le cas contraire, la rétro-morphose la déstabilise et la transforme *in fine* en hornblende.

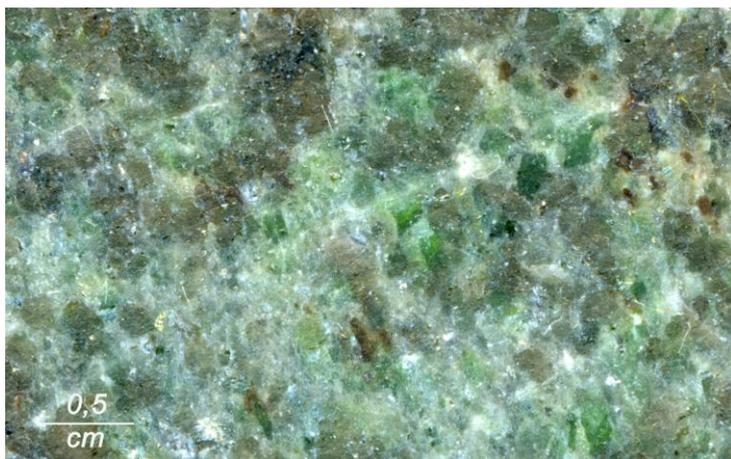


Figure 5a. Éclogite fraîche, faiblement rétro-morphosée. Les grains bruns sont des grenats et les minéraux verts sont l'omphacite. Benayes, Bas Limousin. (Cliché D. Rossier).

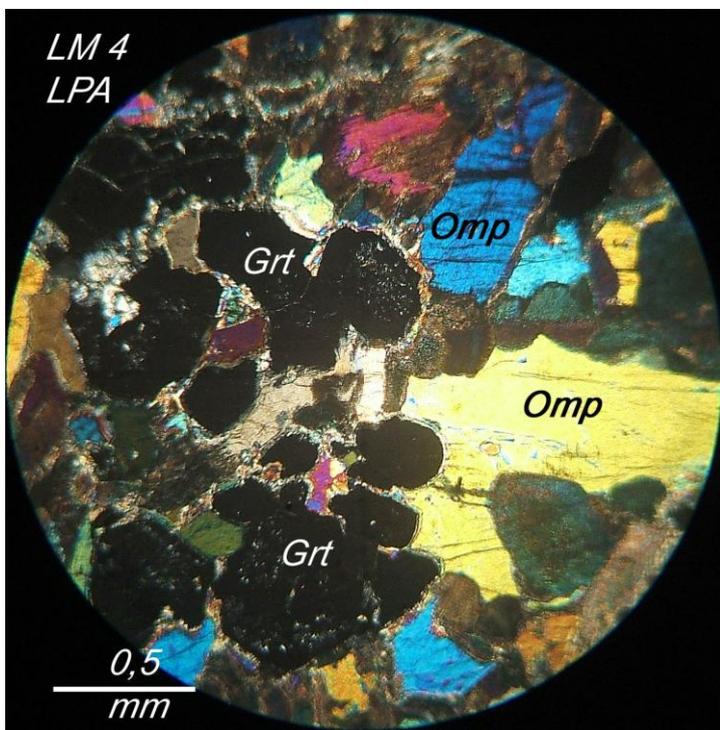


Figure 5b. Éclogite fraîche, faiblement rétro-morphosée en lame mince et LPA, lumière polarisée analysée, faisant apparaître les grenats (Grt) dans une matrice de cristaux d'omphacite (Omp). (Cliché D. Rossier).

2. Le second article du thème : « *À la recherche de l'équilibre perdu* », par B. Dubacq, (Sorbonne, UPMC, Paris 6) s'attaque à l'estimation des équilibres au sein de la roche, et entre minéraux, dans les conditions de métamorphisme de bas degré, dans la gamme de température inférieure à 500 °C. L'approche de ce délicat problème a été rendu possible, jusqu'à l'échelle des cristaux eux-mêmes, grâce aux méthodes « micro-cartographiques » offertes par la microsonde électronique, la micro-fluorescence X et enfin par la spectrométrie de masse par ablation laser. Sur des exemples illustrés de métapélites, l'auteur démontre la bonne adéquation de l'hypothèse d'équilibre local : dans cette gamme de températures modérées, plusieurs étapes d'équilibre se produisent dans le temps, avec formation de paragenèses successives, dont certaines peuvent être conservées; le concept d'équilibre local revient à expliquer ces paragenèses reliques par la thermobarométrie classique appliquée aux minéraux de chaque paragenèse, ceux-ci étant en déséquilibre en regard des minéraux précédemment formés.

3. Le troisième article : « *Techniques, méthodes et outils pour la quantification du métamorphisme* », est présenté par N. Riel et P. Lanard (dept. of Earth Sciences, Durham univ., U. K.). Très technique, cet article développe précisément la méthode micro-cartographique évoquée ci-dessus, avec les outils quantitatifs et logiciels associés. Les auteurs l'ont appliqué à un cas de métamorphisme, cette fois de haut degré, qui peut susciter l'intérêt du lecteur de la SAGA : il s'agit, une fois de plus, des *éclogites*, qui sont, pour emprunter l'image aux auteurs, autant de précieuses « bribes » d'histoire pour l'étude de la formation des chaînes de montagnes. « *A quelles profondeurs ces roches ont pu s'enfoncer (subduction) ? À quelles pressions et températures maximales ont-elles été soumises ? Comment ces éclogites se retrouvent-elles aujourd'hui à la surface à plus de 3 000 mètres d'altitude ?...* ».

De nouveau, l'idée est d'utiliser les lacunes du rééquilibrage thermodynamique au cours de la longue histoire de l'éclogite, ce qui préserve les assemblages « locaux » (voir ci-dessus le concept d'équilibre local). Ces assemblages cristallisés lors de différents stades *pression-température-déformation-temps* sont couramment « archivés » dans un même échantillon de roche. Quand elles peuvent être menées jusqu'au bout, ces études conduisent à des synthèses impressionnantes en terme de trajectoire dans l'espace pression-température, avec aussi la dimension du temps (« trajectoires P-T-t »).

L'exemple choisi est celui d'une éclogite du massif de Stak, au Pakistan, archive remarquable de l'histoire de la formation de l'Himalaya. La figure 6 illustre la puissance des méthodes contemporaines appliquées à

un petit fragment de roche, pour l'établissement de la trajectoire P-T-t ! En conclusion de leur étude, les auteurs établissent « *la présence d'une province éclogitique de plus de 500 km de long, qui signifie qu'une grande partie de la marge indienne est descendue en subsidence continentale. Les marqueurs de cette partie de l'histoire géodynamique ont presque été entièrement effacés par les transformations qui ont pris place durant la collision himalayenne.* »

Ces résultats magnifiques ont été obtenus grâce à l'examen de quelques mm² de lame mince !

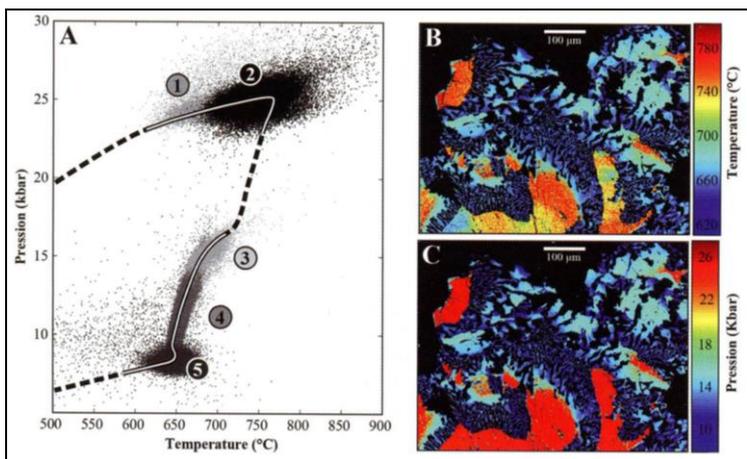


Figure 6 (figure 2-8 du texte). Résultats de l'estimation P-T (méthode inverse) et du trajet P-T interprétatif d'une éclogite du massif de Stak (A) et cartes des P et T des pixels de clinopyroxène (respectivement B et C) modifiés par Lanari et al. (2003, 2014). Les groupes notés de 1 à 5 correspondent aux estimations réalisées avec les différents groupes chimiques définis par Lanari et al. (2013).

4. Le quatrième article de ce second thème de la quantification : **Dater les événements métamorphiques ; exemple du chronomètre Th-U-Pb dans la monazite**, sera une excellente occasion pour le lecteur membre de la SAGA de se ressourcer dans la méthode de datation par couple d'isotopes radioactifs et radiogéniques, et dans le concept fondamental de « fermeture » d'un système isotopique. L'article est signé par A. Didier (univ. de Lausanne, sciences de la Terre) et V. Bosse (Lab. magmas et volcans, univ. Blaise Pascal, Clermont Ferrand).

Le lecteur apprendra aussi que la *monazite*, phosphate de terres rares dopé au thorium et à l'uranium, est tout aussi capable d'enregistrer les processus géologiques de hautes températures que les traditionnels *zircons*. La monazite est familière aux membres du séminaire de pétrographie de la SAGA, qui l'observent régulièrement en inclusion au côté des zircons, « décorant » les biotites des métapelites et des granitoides. Les auteurs montrent qu'en couplant l'étude pétrologique à l'étude géochronologique, il est possible d'aller beaucoup plus loin dans la reconstitution

de l'histoire métamorphique d'une roche. Les inclusions de monazite sont souvent zonées du cœur à la bordure, avec des concentrations en yttrium et en terres rares qui enregistrent au cours du temps les épisodes successifs de fusion anhydre ou au contraire producteurs de fluides.

Une nouvelle ère pour la géochronologie ?

Troisième thème, « *le fluide, l'Arlésienne du métamorphisme* ».

1. À coup sûr, le premier article du thème, « *Les marqueurs des évaporites dans la formation des gemmes métamorphiques* », va ravir les amateurs friands des belles pierres, émeraude, rubis, lapis-lazuli, tsarovite... En même temps, il satisfera ceux qui veulent comprendre comment le métamorphisme de moyen et de haut degré, agissant sur des formations sédimentaires de plate-forme continentale de tout âge, peut conduire à ces pures merveilles. La clé de ces transformations est dans la circulation de saumures libérées par le protolithe évaporitique. Là encore, ce sont les observations d'inclusions minérales ou/et fluides (figure 7), qui conduisent à l'interprétation du miracle.

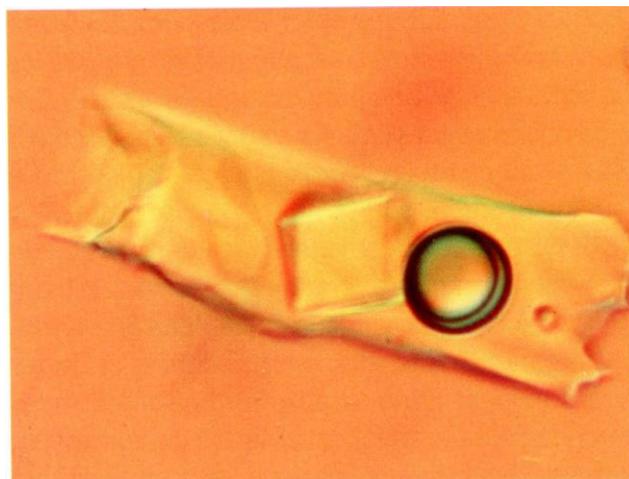


Figure 7 (figure 3-3 du texte). Inclusion fluide primaire, de 30 micromètres de long, piégée dans une émeraude du gisement de Coscuez (Colombie). La cavité contient un liquide aqueux prédominant, un cube de halite, une bulle de vapeur et un liquide carbonique.

Collectif d'auteurs particulièrement nombreux pour ce sujet excitant : G. Giuliani (univ. Paul Sabatier, Toulouse et univ. de Lorraine), J. Dubessy (Univ. de Lorraine), D. Ohnenstetter (Univ. de Lorraine), D. Banks (univ. of Leeds, U. K.), J. Feneyrol (*Arethuse geology*), Y. Branquet (ISTO, Univ. d'Orléans et Géosciences Rennes, univ. de Rennes), A. E. Fallick (*Isotope Geosciences, Glasgow, U. K.*).

2. Eh oui ! Encore un article en relation avec le cycle de la lithosphère océanique, et les ophiolites : **Les serpentinites, vecteurs des transferts de fluides dans le globe**, par B. Debret (*Dept. Of Sciences, Durham, U. K.*). Article bien utile pour ceux qui ont fait le voyage d'étude au Chenaillet et qui ont admiré le complexe de ride lente, où les serpentinites sont associées aux basaltes en coussin et aux gabbros. De plus, l'article parcourt tous les faciès des méta-ophiolites lors de leur formation puis de leur transformation par subduction. L'article précise bien les conditions en pression et en température d'apparition des trois principaux minéraux des serpentinites :

- la lizardite et le chrysotile en conditions intra-océaniques ;

- l'antigorite dans les conditions de début de subduction, stable jusqu'à des températures de 700 °C.

La serpentinite résultant de l'hydratation et de la recristallisation de péridotites à des températures inférieures à 700 °C, est gorgée d'eau océanique, jusqu'à 13 % de son poids !

Aussi, lors du processus de subduction, au fur et à mesure de l'augmentation de pression et de température, elle va servir de réservoir principal de fluides et d'éléments volatils dissous, et va migrer vers la partie inférieure du coin mantellique juste au-dessus de la plaque en subduction : à son tour, la péridotite du coin va se serpentiner, voire fondre. C'est la naissance du magmatisme d'arc.

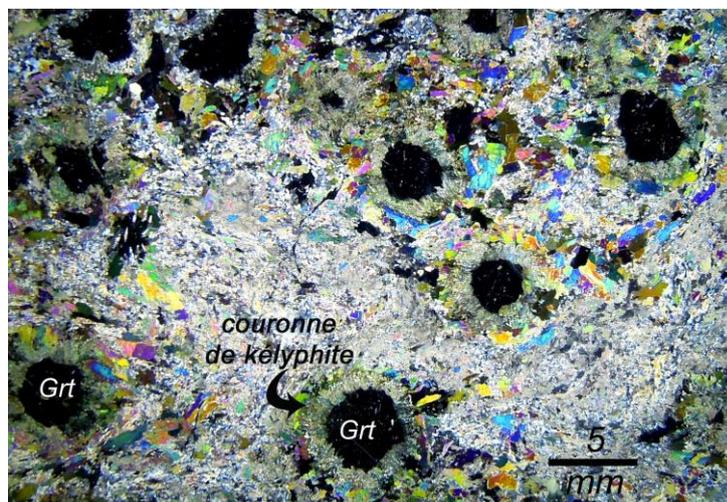
3. Le troisième article de ce thème du « fluide » est en continuité avec le précédent, puisqu'il traite de la part des roches magmatiques de la croûte océanique dans le transfert d'éléments accompagnant la déshydratation de la plaque plongeant en subduction. Le titre de ce court article est : **Piégeage et libération des halogènes dans les métagabbros océaniques**, par C. Nicollet et F. Cattani (Lab. Magmas et volcans, Univ. Blaise Pascal, Clermont-Ferrand).

L'article analyse la présence du fluor (F) et du chlore (Cl) (halogènes les plus communs) dans les magmas d'arc, donc au-dessus des zones de subduction (voir la fin du résumé du précédent article). Ces deux éléments peuvent servir de traceurs chimiques témoins de la déshydratation de la plaque plongeante.

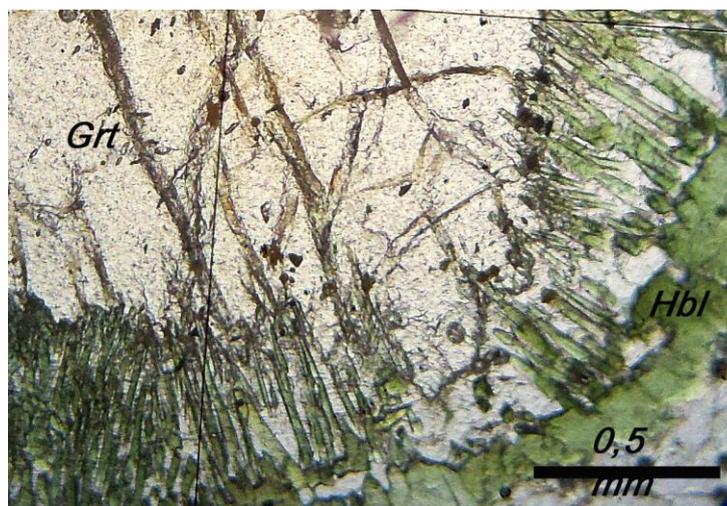
Dans ce transfert par stockage, suivi d'un transport et d'une libération, ce sont les amphiboles qui jouent le premier rôle, les deux types d'amphibole verte et brune, que nous avons bien observées dans les ophiolites rapportées lors du voyage d'étude dans le Chenaillet.

Les preuves de contamination en Cl et F existent bien dans les roches métamorphosées puis fondues dans le coin mantellique, puis dans le magmatisme d'arc, mais les conditions de cette contamination restent à établir.

4. Au terme de ce parcours complexe, où chimie et physique sont étroitement associées à la géologie et à la géophysique, un dernier article fait le point sur le rôle fondamental des fluides H₂O et CO₂ sur les réactions métamorphiques : « **Rôle des fluides dans le métamorphisme** », Ph. Goncalves (Lab. Chrono-environnement, Univ de Bourgogne Franche Comté, Besançon) et C. Durand (Lab. Génie civil et géo-environnement, Univ. de Lille).



Figures 8a et 8b. Éclogite rétomorphosée, en voie d'amphibolitisation. Puy de Ferrières, Bas Limousin. Cliché 8a (ci-dessus) : lame mince passée au scanner en lumière polarisée analysée. Les grenats, d'un diamètre de 3 à 4 mm, sont cerclés d'une couronne de kélyphite épaisse d'un millimètre. Ils baignent dans une matrice d'omphacite largement déstabilisée et en voie d'amphibolitisation.



Le cliché 8b, au microscope en LPA, montre la texture d'intercroissance, finement divisée, de l'« écorce » réactionnelle. Les cristaux en aiguilles alternées sont des amphiboles et des plagioclases. (Clichés D. Rossier).

Les exemples donnés mettent en lumière le rôle de la pression partielle, donc de la teneur en fluides de la

roche, ainsi que de la composition de cette phase fluide. Les auteurs rappellent dans l'introduction de l'article, une réalité souvent négligée : le rôle des fluides est toujours capital, même à des doses extrêmement faibles.

Prenons l'exemple des réactions solide-solide que nous observons autour d'un grenat, dans une éclogite rétrotransformée (figures 8a et 8b).

Le grenat est « coronitisé », ce qui se traduit par l'apparition d'une auréole kélyphitisée : la kélyphite (*keluphos* en grec est l'écorce) désigne un agrégat de cristaux aciculaires, rayonnant en bordure réactionnelle du grenat. Or ceci ne peut pas s'expliquer en l'absence de fluides. En effet, la cinétique de diffusion des cations (Fe, Ca, Al...) est beaucoup trop lente, même à hautes températures, pour expliquer ces textures majestueuses qui se développent sur des distances parfois millimétriques autour des grenats. Seule la présence de molécules d'eau, même en proportions infimes, abaisse l'énergie d'activation de façon à mobiliser les cations et permettre le rééquilibrage des minéraux entre eux sur des distances macroscopiques et visibles à l'œil nu !

En conclusion, pour les auteurs, il s'agit d'un domaine de recherche encore largement ouvert. Son importance doit être appréciée en rappelant que c'est aussi le domaine du métasomatisme, associé à des gisements de minéraux.

La cerise sur le gâteau !

Vous trouverez en milieu du numéro, sous le titre « **Cycle de la lithosphère océanique et métamorphique** », un merveilleux cahier de six pages, intitulé « **Réalité Terrain** », consacré à un beau voyage pétrologique à travers les Alpes, de Grenoble à Turin, en passant par le massif de Belledonne, celui du Chenaillet, le Queyras, le mont Viso et le massif du Lanzo. Il a été composé par Christian Nicollet lui-même.

Très bien documentée, et richement illustrée de photos et de schémas de lecture de paysage, voici une invitation au voyage et à la randonnée dont vous pourrez user sans retenue. D. R.

Conférence

À la Commission de volcanisme

Dans le cadre des activités de la Commission, nous vous invitons à assister à la conférence de Benoît Ildéfonse, le mercredi 4 mai prochain, à la SAGA, à 18 h30, dans la salle de conférence (bâtiment de la géologie).

Benoît Ildéfonse est Directeur de recherches au CNRS, laboratoire des Géosciences, à Montpellier. Son principal

axe de recherche est **la formation et l'évolution de la lithosphère océanique**.

Sa carrière l'a amené à étudier les ophiolites d'Oman, la structure et les propriétés physiques des magmas, et les propriétés physiques de la croûte océanique. Il a exercé des responsabilités dans les programmes internationaux ODP et IODP, ainsi que dans le projet « *MoHole to the mantle* ». Dernièrement il a participé à l'expédition 360 sur le navire océanographique *Joides resolution*, qui opère sur le « *Indian Ridge Moho* ».



The riser drilling vessel Chikyū

Formation et évolution de la croûte océanique : ce que nous apprend le forage scientifique

Cette présentation s'appuie sur les résultats les récents du programme IODP dans la croûte océanique, pour traiter des processus d'accrétion et de refroidissement aux dorsales océaniques lentes et rapides. Je montrerai brièvement comment fonctionne le forage océanique.

En 2004-2005, les expéditions 304-305 ont illustré le rôle des failles de détachement, ainsi que du magmatisme et de la circulation hydrothermale qui y sont associés, dans la construction de la croûte océanique dans les régions pauvres en volcanisme des dorsales lentes. Dans la croûte rapide, l'échantillonnage des gabbros de la croûte inférieure est essentiel pour comprendre ces processus ; ils ont été échantillonnés en 2013 à Hess Deep, dans le Pacifique (expédition 345).

Dans la croûte ultrarapide intacte de la plaque Cocos, dans le Pacifique Est, les opérations de forage au site 1256 ont été difficiles (expédition 335), et les gabbros de la croûte inférieure n'ont pas encore été atteints. Le matériel de la zone de transition entre complexe filonien et gabbros récupéré dans le puits 1256D témoigne d'une zone d'interactions complexes entre systèmes magmatique et hydrothermal à l'axe de la dorsale.

Pour finir, j'évoquerai les prochains enjeux du forage scientifique dans la lithosphère océanique, avec notamment le projet « *MoHole to the Mantle* » dont l'ambition est d'atteindre et d'échantillonner le manteau terrestre sous la croûte rapide du Pacifique.