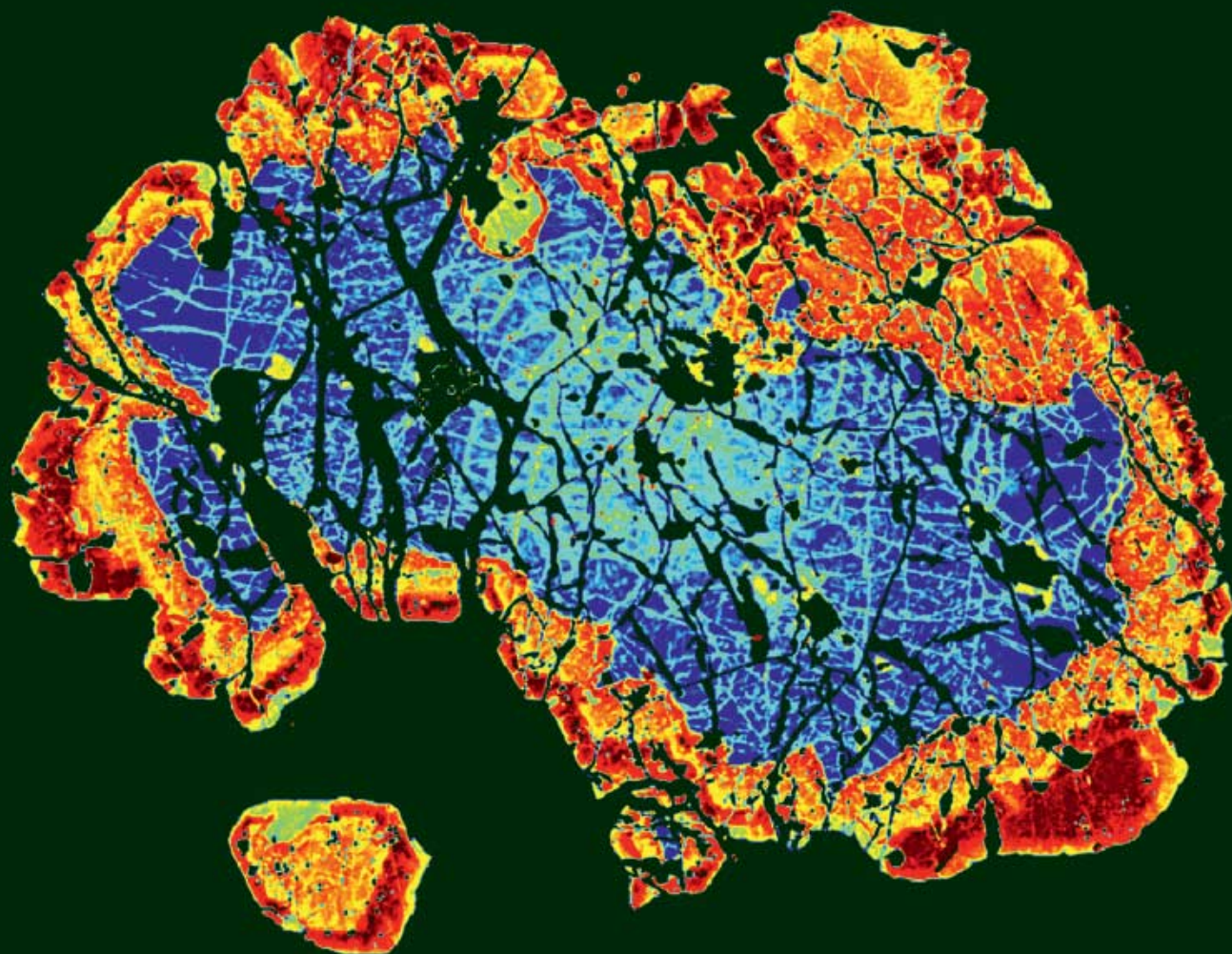


GÉOCHRONIQUE

n°136

Magazine des Géosciences

Décembre 2015 / 20 €



Regards croisés sur le
Métamorphisme

Regards croisés sur le Métamorphisme

Ces dernières décennies, les « limites du métamorphisme » ont été significativement repoussées vers les hautes pressions (HP) et les hautes températures (HT). Le domaine du métamorphisme est très vaste et « central » dans l'espace Pression - Température (ou bien profondeur - température) représentant les conditions à l'intérieur de notre globe (cf figure). Ainsi, toute roche a de fortes probabilités d'être, à un moment ou l'autre de son histoire, métamorphisée. Une très légère augmentation de température (et pression) permet de passer de la roche sédimentaire à la roche métamorphique ; lors de sa remontée jusqu'à la surface, une roche magmatique qui refroidit supportera très certainement des transformations métamorphiques à BT-BP. Et lorsque l'on étudie les roches archéennes, il ne faut pas oublier que celles-ci sont toutes métamorphiques !

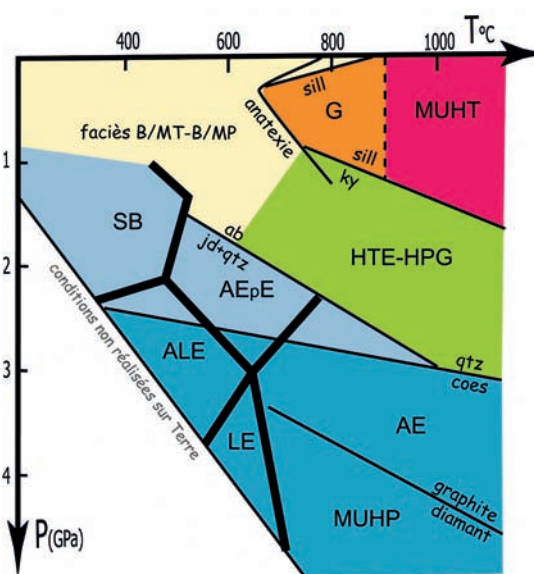
trondhjémites, granites.

Peut-être avons-nous trop insisté, par simplification, sur le fait que le métamorphisme est considéré isochimique et que, dès lors, on peut l'ignorer puisqu'il est sans effet sur la composition. Quoiqu'il en soit, ces descriptions sont restrictives, car elles occultent souvent une bonne partie de l'évolution géodynamique de ces roches !

Plusieurs entrées sont possibles pour aborder l'étude du métamorphisme. Nous en retiendrons trois dans ce dossier. Tout d'abord, pour définir l'espace occupé par le métamorphisme dans les processus affectant la lithosphère, nous nous intéresserons aux limites dans l'espace P-T-temps. Nous nous préoccuperons ensuite des progrès réalisés dans le domaine de la quantification de ces paramètres P, T, temps. Enfin, nous nous focaliserons sur la phase fluide, un des paramètres fondamentaux du métamorphisme pourtant mal contraint et dont le rôle sur les transferts des éléments a trop longtemps été négligé.

Avec les progrès de la technologie, les nouveaux outils d'acquisition de données nous permettent déjà et nous permettront de mieux en mieux de quantifier les transferts de matière de manière précise. Non !, le métamorphisme n'est pas un processus isochimique et il ne sera plus possible de l'ignorer lors de l'étude de roches qui ont migré, à l'état solide, dans ce vaste espace P-T.

Extension du domaine du métamorphisme et faciès métamorphiques - MUHT/P : métamorphisme d'ultra haute température/pression ; HTE-HPG : faciès Eclogite de haute température - faciès Granulite de haute pression ; G : faciès Granulite ; B/MT- B/MP : faciès de basse et moyenne température/pression ; SB : faciès Schiste Bleu ; E : faciès Eclogite ; A : amphibole ; Ep : épidote ; L : lawsonite ; (d'après Brown, 2007 - International Geology Review, vol. 49, 2007, p. 193-234).



Cet aspect est souvent négligé comme le démontrent les nombreuses descriptions pétrographiques erronées. En voici deux exemples (parmi tant d'autres) concernant des lithologies très abondantes, respectivement dans la lithosphère océanique et dans la lithosphère continentale. Il est commun de qualifier de « péridotites » les serpentinites recueillies dans les forages océaniques IODP ; de même, les « Gneiss Gris » archéens, ces roches métamorphiques caractéristiques de la croûte continentale archéenne, sont improprement appelés « TTG », abréviations des noms des roches magmatiques dont ils dérivent : tonalites,

I > Les limites du métamorphisme

La transition entre diagenèse et métamorphisme, limite à BT-BP du métamorphisme, correspond rarement à une limite franche, mais plutôt à une transition continue. L'article **La transition diagenèse métamorphisme** nous présente les difficultés pour localiser cette limite, malgré un large éventail de différents marqueurs appliqués à des lithologies très diverses.

Les hautes températures marquent la limite avec les roches magmatiques, une limite très vaste : c'est le domaine de l'anatexie qui s'étend sur un intervalle de température de plus de 300°C dans lequel coexistent roches magmatiques et métamorphiques. L'abondance des granites dans le Massif central français en fait un excellent terrain de jeu pour étudier l'anatexie traitée dans **Fusion partielle, extraction des liquides et différenciation de la croûte continentale : l'exemple du Massif central français**.

La limite du métamorphisme vers les très grandes pressions (ou ultra hautes pressions = UHP) est d'une autre nature que les précédentes. La recristallisation à l'état solide n'a pas de limite en profondeur. Mais ce qui nous importe, c'est la profondeur maximale atteinte par les roches qui ont ensuite été exhumées à la surface du globe. Nous abordons ce thème sous un aspect historique. Dans **Le métamorphisme de (ultra) haute pression : deux siècles de débats**, l'auteur nous montre comment a évolué l'étude du métamorphisme de (U)HP depuis deux cents ans, en prenant l'exemple de l'éclogite, cette « roche choisie ».

Dans **Métamorphismes extrêmes et refroidissement de la Terre**, nous discutons de l'évolution de ces limites au cours du temps, tandis que le globe se refroidissait : quelles informations pour la compréhension de la géodynamique de la Terre ancienne ?

2 > La quantification

La quantification est évidemment l'un des soucis majeurs du pétrologue pour évaluer les différents paramètres responsables des processus métamorphiques. Dans ce domaine, les progrès de la technologie et des capacités de calcul nous sont d'un grand secours. Avec **Les apports de l'expérimentation à la modélisation des processus métamorphiques**, nous abordons la contribution de l'étude expérimentale sur la quantification. Parfois l'expérimentation a confirmé l'observation pétrographique, parfois elle l'a devancée. Dans tous les cas, elle a permis de proposer des valeurs numériques sur les limites des faciès et sur les conditions des équilibres minéralogiques.

Dans **À la recherche de l'équilibre perdu**, il est montré comment la migration des espèces chimiques impacte l'équilibre local, en particulier dans les contextes faiblement métamorphiques, et comment la cartographie élémentaire d'éléments mineurs apporte de nouveaux éléments de réflexion à la pétrologie de ces roches. La notion cruciale d'échelle ou volume d'équilibre et de distance de transfert de matière est abordée.

Une excellente mise au point de la thermo-barométrie est faite dans l'article **Techniques, méthodes et outils pour la quantification du métamorphisme**. Les auteurs appliquent ces méthodes pour caractériser l'évolution des paramètres P et T lors de l'exhumation d'une éclogite himalayenne.

En effet, un épisode métamorphique n'est pas un événement ponctuel à une T, P et t fixes. Il est, au contraire, caractérisé par une évolution progressive de la température et de la profondeur pendant un intervalle de temps qui peut durer plusieurs millions d'années, dizaines de millions d'années, voire peut-être plus.

La quantification du paramètre « temps » est présentée dans **Dater les événements métamorphiques : exemple du chronomètre Th-**

U-Pb dans la monazite. Que date-t-on d'un événement qui évolue continûment en profondeur et en température au cours du temps ? Quelle(s) étape(s) est(sont) responsable(s) de la fermeture du système isotopique qui sert de chronomètre ? L'analyse ponctuelle rendue possible grâce au développement de nouvelles techniques analytiques, permet de faire de la pétro-chronologie, c'est-à-dire l'étude des minéraux chronomètres en position pétrographique. Cet article montre qu'une donnée géochronologique doit toujours être abordée avec un esprit critique.

Ce chapitre nécessite une approche physico-chimique indispensable à la quantification. Celle-ci ne doit pas rebuter le lecteur plutôt « naturaliste » : les paragraphes concernés sont rédigés avec clarté et je suis sûr qu'un petit effort lui permettra d'appréhender ces principes avec satisfaction. Toutefois, la lecture de ces passages « difficiles » peut se faire ultérieurement, car les auteurs ont veillé à ce qu'ils ne soient pas indispensables à la compréhension de l'article dans son ensemble.

3 > Le fluide, l'Arlésienne du métamorphisme

Comme l'Arlésienne dans la nouvelle d'Alphonse Daudet, jamais visible mais bien présente, le fluide est une phase souvent invisible dans la paragenèse des roches, mais au rôle considérable. Dans les articles précédents, il est souvent fait allusion, de manière plus ou moins explicite (plutôt plus que moins !) au rôle des fluides. Aussi, nous leur attacherons une attention tout particulière dans ce troisième chapitre. Ces fluides dont la composition change constamment, interviennent de manière parfois pervasive* ou le plus souvent chenalisée, à différentes étapes de l'histoire d'une roche. Les fluides modifient la composition chimique, transfèrent la chaleur ; leur rôle est fondamental sur la cinétique de réaction : celle-ci ne se déclenche que lorsque les fluides sont disponibles sur le site de la réaction.

On considère, en première approximation, que le processus métamorphique est isochimique à l'exception des fluides. Cette phrase contient deux idées contradictoires : les fluides qui quittent ou qui entrent dans une roche ne sont pas inertes. Ils interagissent avec elle et engendrent des transferts de matière qui contribuent aux réactions métamorphiques (métasomatiques* !).

Plusieurs contributions montrent le rôle considérable des fluides dans le transfert des éléments à travers le globe. Pour introduire ce chapitre, quels exemples plus spectaculaires que ceux présentés dans **Les marqueurs des évaporites dans la formation des gemmes métamorphiques ?** La formation de certaines gemmes nécessite l'intervention de saumures à forte salinité. Dans **Les serpentinites, vecteurs des transferts de fluides dans le globe**, c'est le rôle de la transformation réversible péridotite – serpentinite - qui fait intervenir une grande quantité de fluide - sur les

transferts d'éléments, à grande échelle, au cours du cycle de la lithosphère océanique. Dans cette lithosphère océanique, les roches magmatiques sont en contact avec l'hydrosphère avec laquelle les transferts sont importants avant un retour vers le manteau. Nous en présentons quelques aspects dans cet article : **Piégeage et libération des halogènes dans les métagabbros océaniques**. Dans le dernier article de ce chapitre, les auteurs tentent de quantifier le **Rôle des fluides sur le métamorphisme**, par une analyse géométrique des relations des phases à travers trois exemples très communs : la rétro-morphose d'une métapélite ; la formation d'un skarn* ; une zone de cisaillement. Dans ces trois exemples, ils évaluent la teneur, la composition des fluides et les transferts de matière.

Un sujet inépuisable. Il faudra encore du temps pour arriver à quantifier cette phase et ses fluctuations avec précision, pour évaluer son rôle, son influence : il y a là un travail considérable pour les futures générations !

Nous présentons également dans ce dossier une excursion sur le thème du **Cycle de la lithosphère océanique et métamorphisme**. Dans

les Alpes occidentales, il est possible de suivre l'ensemble du cycle de la lithosphère océanique depuis sa genèse par fusion partielle du manteau ascendant, son refroidissement et son interaction avec l'hydrosphère, son retour dans le manteau et bien sûr, sa nécessaire exhumation jusqu'à nous ! Un bel objet d'étude des processus pétrologiques, à la fois magmatiques et métamorphiques. Plusieurs générations de minéraux coexistent, enregistrant incomplètement ces différentes étapes : une excellente opportunité pour appréhender, dès l'étude de terrain, le rôle des paramètres qui interviennent sur la cinétique des réactions.

Les contributions de ce dossier sont issues de chercheurs confirmés mais également de chercheurs débutants, post-doctorants et jeunes chercheurs/enseignants-chercheurs. Par leur contribution, ils montrent tout le dynamisme de la recherche autour du métamorphisme. Je remercie les collègues, contributeurs ou non de ce dossier, qui ont bien voulu faire une lecture critique des différents articles.

■ **C. Nicollet**

Lab. Magmas et Volcans, Univ. Blaise Pascal - CNRS - IRD, OPGC, 5 rue Kessler, 63038 Clermont-Ferrand

Ce dossier a été coordonné par Christian Nicollet que nous remercions vivement.

La rédaction

Unités de pression utilisées dans ce dossier : l'unité officielle, le Pascal (Pa), est bien petite pour la géologie. En effet, le bar vaut 10^5 Pascal. On utilise souvent le kilobar (kb) ou le mégapascal (100 MPa = 1 kb) ou encore le gigapascal (1 GPa = 10 kb).

Un glossaire* et les abréviations des minéraux se trouvent à la fin de ce dossier.

La bibliographie des articles peut être consultée sur le site de la SGF à l'adresse suivante : <http://www.geosoc.fr/publication/geochronique/numero-actuel.html>

Regards croisés sur le Métamorphisme

C. Nicollet - *Introduction*

1 – Les limites du métamorphisme

M. Dubois et F. Bourdelle - *La transition diagénèse métamorphisme*

V. Gardien - *Fusion partielle, extraction des liquides et différenciation de la croûte continentale : l'exemple du Massif Central français.*

G. Godard - *Le métamorphisme de (ultra) haute pression : deux siècles de débats*

C. Nicollet - *Métamorphismes extrêmes et refroidissement de la Terre.*

2 – La quantification

T. Hammouda - *Les apports de l'expérimentation à la modélisation des processus métamorphiques*

B. Dubacq - *A la recherche de l'équilibre perdu*

N. Riel et P. Lanari - *Techniques, méthodes et outils pour la quantification du métamorphisme*

A. Didier et V. Bosse - *Dater les événements métamorphiques: exemple du chronomètre Th-U-Pb dans la monazite.*

3 – Le fluide, l'arlésienne du métamorphisme

G. Giuliani et al - *Les marqueurs des évaporites dans la formation des gemmes métamorphiques*

B. Debret - *Les serpentinites, vecteurs des transferts de fluides dans le globe*

C. Nicollet et F. Cattani - *Piégeage et libération des halogènes dans les métagabbros océaniques.*

P. Goncalves et C. Durand - *Rôle des fluides sur le métamorphisme*

Réalité terrain

C. Nicollet - *Cycle de la lithosphère océanique et métamorphisme.*