



HAL
open science

Les Alpes, laboratoire naturel pour l'évolution des concepts pétrologiques

Christian Chopin

► **To cite this version:**

Christian Chopin. Les Alpes, laboratoire naturel pour l'évolution des concepts pétrologiques. Travaux du Comité français d'Histoire de la Géologie, 2022, 3ème série (tome 36), pp.59-72. hal-04646139

HAL Id: hal-04646139

<https://hal.science/hal-04646139>

Submitted on 12 Jul 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Les Alpes, laboratoire naturel pour l'évolution des concepts pétrologiques

Christian CHOPIN

Laboratoire de Géologie, CNRS – ENS – PSL, Paris

Résumé. L'importance des études alpines dans l'évolution des concepts métamorphiques au cours des dernières décennies est passée en revue, avec quelques préjugés personnels. Des exemples en sont le lien entre tectonique et métamorphisme, avec le métamorphisme barrovien post-nappe dans les Alpes centrales et les contacts de chevauchement majeurs postérieurs à i) un métamorphisme de faible intensité dans les Alpes centrales externes et ii) un métamorphisme à haute pression dans les Alpes occidentales ; la variété d'outils (y compris des études sur les inclusions fluides) développés pour caractériser le métamorphisme de faible à très faible degré, conduisant au concept d'anchizone ; des études historiques sur le métamorphisme progressif des carbonates siliceux et des marnes ; de l'éclogite et même de la péridotite à grenat reconnues comme produits possibles d'un métamorphisme prograde ; le déchiffrement des relations de phase à haute pression dans les compositions mafiques et pélitiques (élucidant l'importance de l'éclogite disthène dans la première, de la carpholite Mg-Fe et des assemblages talcifères dans la seconde) ; la subduction continentale et le concept de métamorphisme de ultra haute pression ; le rôle débattu du stress déviatorique dans des conditions de pressions aussi peu communes, les meilleures études de cas pour soutenir et réfuter l'hypothèse étant alpines. C'est aussi l'occasion de raconter la découverte de la coésite dans les Alpes, les conditions qui l'ont facilitée et la façon dont elle a été accueillie dans la communauté.

Mots-clés : géologie alpine – métamorphisme – pétrologie – cartes métamorphiques – haute pression – carpholite – éclogite – coésite

Abstract. The importance of Alpine studies in the evolution of metamorphic concepts during the last decades is reviewed, with some personal bias. Examples are the link between tectonics and metamorphism, with post-nappe Barrovian metamorphism in the Central Alps and major thrust contacts post-dating i) low-grade metamorphism in the external Central Alps and ii) high-pressure metamorphism in the Western Alps; the variety of tools (including fluid-inclusions studies) developed to characterize low- to very-low-grade metamorphism, leading to the concept of anchizone; epoch-making studies of the prograde metamorphism of siliceous carbonates and marls; eclogite and even garnet peridotite recognized as possible products of prograde metamorphism; the deciphering of high-pressure phase-relationships in both mafic and pelitic compositions (elucidating the significance of kyanite eclogite in the former, of Mg-Fe-carpholite and of talc-bearing assemblages in the latter); continental subduction and the concept of ultrahigh-pressure metamorphism; the debated role of deviatoric stress in such uncommon pressures, with the best case studies to support and to refute the hypothesis being Alpine. This is also the opportunity for an account of the discovery of coesite in the Alps, the conditions that facilitated it and the way it was received in the community.

Key-words: Alpine geology – metamorphism – petrology – metamorphic maps – high pressure – carpholite – eclogite – coesite discovery

Les Alpes sont le berceau de nombreux concepts géologiques, tectoniques en particulier, mais aussi une terre importante pour la compréhension du métamorphisme. Sans remonter aux pères zurichois Ulrich Grubenmann et Paul Niggli (*Die Gesteinsmetamorphose*, 1924), et puisque j'ai été invité à le faire, je voudrais illustrer cette importance à travers la vision personnelle que j'en ai eue comme praticien, sur un peu plus de quatre décennies. J'aime la notion de laboratoire naturel, où les observations offrent des enseignements qui portent bien au-delà des Alpes, par exemple sur :

- les relations entre métamorphisme et tectonique, en particulier mouvement des nappes, et l'outil cartographique
- le métamorphisme de bas degré ;
- l'évolution des idées sur les éclogites et le faciès éclogite ;
- la notion d'unité métamorphique cohérente, c'est-à-dire la relation des roches de haute pression avec leur « banal » encaissant schisteux ou gneissique ;
- les relations de phases à haute pression et basse température (HP-BT) ;
- le métamorphisme de très haute pression.

Les Alpes centrales, à portée de main des grandes écoles suisses, ont tenu une place importante dans les débuts de la cartographie métamorphique et le déchiffrement de la progression d'un métamorphisme de type barrovien. Voici les principaux jalons que Martin Frey (1940-2000) y identifiait dans l'étude du métamorphisme alpin (FREY & FERREIRO MÄHLMANN, 1999), lors de la publication d'une belle carte métamorphique des Alpes, au 500 000^e (FREY *et al.*, 1999).

- 1960 Première carte de distribution de minéraux du métamorphisme alpin tertiaire (stilpnomélane, chloritoïde, amphibole sodique, disthène, sillimanite) par Niggli (1960).
- 1962 Utilisation de la teneur en anorthite (An) du plagioclase comme index du degré métamorphique (WENK, 1962).
- 1965 Nouvelle carte de distribution de minéraux du métamorphisme alpin (ajoutant

la staurotite à la liste précédente ; NIGGLI & NIGGLI, 1965).

- 1966 Métamorphisme progressif des carbonates siliceux et première cartographie de l'isograde d'apparition du diopside (+ CO₂ + H₂O) aux dépens de trémolite + calcite + quartz (TROMMSDORF, 1966).
- 1969 Suivi du métamorphisme progressif d'une formation pélitique et marneuse depuis la diagenèse jusqu'au faciès amphibolite (FREY, 1969).
- 1973 Carte métamorphique des Alpes à 1/1 000 000 (NIGGLI & ZWART, 1973).
- 1974 Métamorphisme progressif des roches ultramafiques (TROMMSDORFF & EVANS, 1974).
- 1974-76 Cartographie tridimensionnelle d'isogrades (STRECKEISEN & WENK, 1974 ; THOMPSON, 1976).
- 1980 Premières estimations P-T le long de la Géotraverse Bâle-Chiasso (FREY *et al.*, 1980a).
- 1983 Premier chemin P-T quantitatif (BUCHER & DROOP, 1983).
- 1995-97 Premières cartes d'isothermes et d'isobares du métamorphisme tertiaire dans le domaine lépontin (ENGI *et al.*, 1995 ; TODD & ENGI, 1997).

Suivra une nouvelle carte générale des métamorphismes alpins au 1 000 000^e (OBERHÄNSLI *et al.*, 2004), reprise et complétée par BOUSQUET *et al.* (2012) et publiée par la Commission de la carte géologique du Monde.

Ces différentes cartes montrent combien les Alpes, grâce à leur topographie, sont un lieu d'excellence non seulement pour l'avancée des concepts tectoniques, mais aussi dans la compréhension des relations entre tectonique et métamorphisme — qu'il s'agisse d'isogrades déformés (dôme lépontin), ou de métamorphisme transporté (e.g. klippe supérieures du Chablais, nappe de Glarus [ou Glaris] en domaine externe ; Dent-Blanche, diverses unités de schistes lustrés et des massifs Grand-Paradis et Dora-Maira en domaine plus interne) (Fig. 1). Le progrès est manifeste de carte en carte et reflète l'amélioration continue des outils pétrologiques, dont beaucoup furent, de fait, forgés dans les Alpes

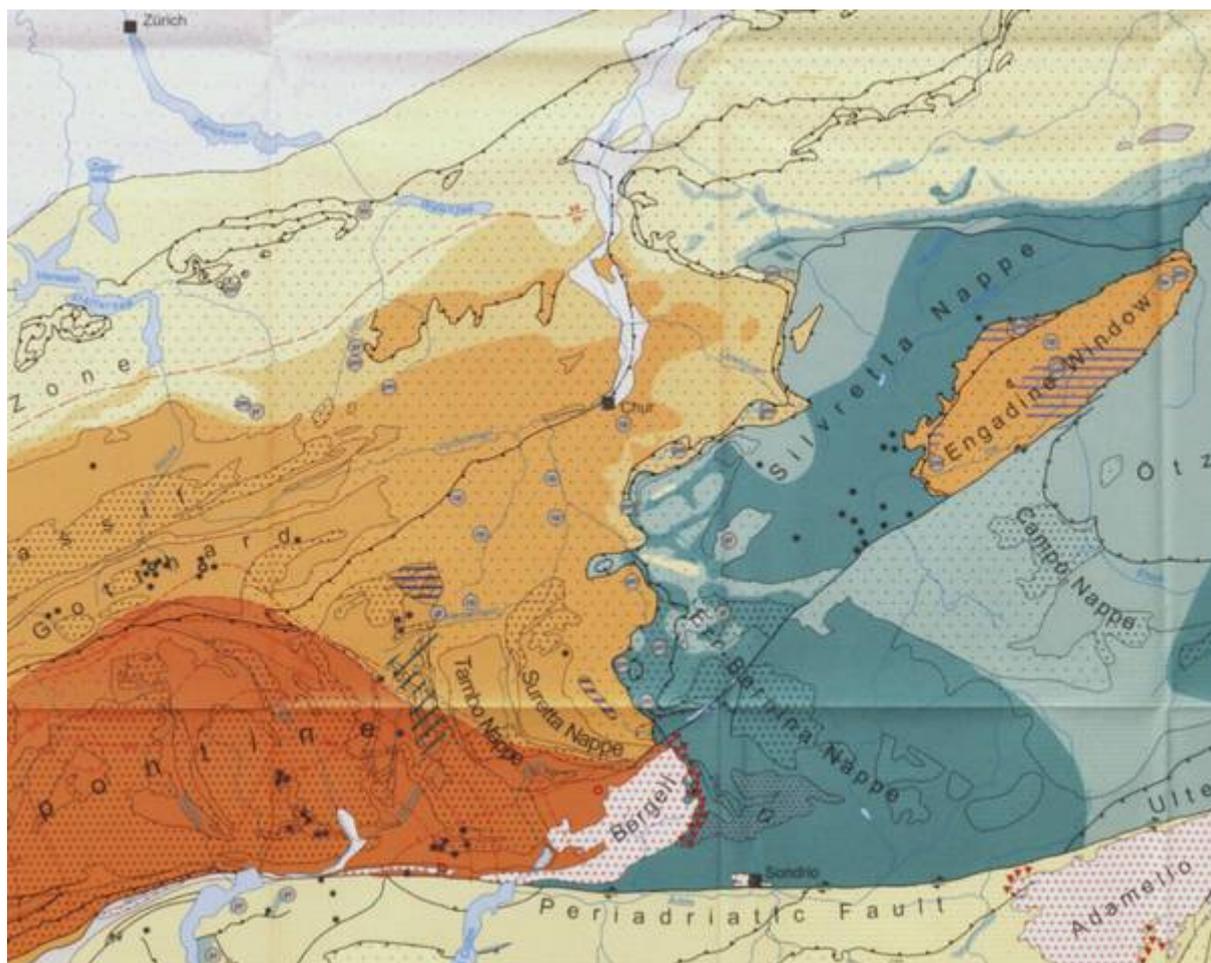


Fig. 1. Un extrait de la carte métamorphique des Alpes de FREY *et al.* (1999), aux confins des Alpes centrales et orientales, montrant la richesse des relations métamorphisme / déformation et la résolution atteinte pour les conditions métamorphiques. L'âge des métamorphismes crétacé et tertiaire est rendu par une couleur, dont les dégradés traduisent l'intensité du métamorphisme, depuis des domaines plissés non métamorphiques jusqu'au faciès amphibolite. Le métamorphisme transporté par le chevauchement du Glarus, au nord-ouest de Chur, est très apparent. Dans la nappe de l'Adula, à l'ouest de Tambo, les hachures épaisses indiquent un métamorphisme de haute pression, clairement repris dans le faciès amphibolite du dôme lépontin dont les isothermes et isobares de la culmination (lignes pointillées rouges) recoupent toutes les limites de nappe.

Ainsi, la modestie de Frey le conduit à ne pas s'étendre sur un point essentiel, le métamorphisme de bas et très bas degré. Les zones externes des Alpes en sont devenues, dans les années 1970, un domaine de référence par le développement et la combinaison d'approches indépendantes : diffraction X sur les phyllosilicates (cristallinité de l'illite, interstratifiés), réflectance de la vitrinite, inclusions fluides, isotopes stables, envisageant enfin l'évolution de la roche avec ses

fluides. Les noms de Martin Frey (e.g. FREY *et al.*, 1980b) et Bernard Kübler (1930-2000) y restent attachés avec, pour les inclusions fluides, celui de Josef Mullis (et, géographiquement plus près de nous, Bernard Poty, Jean-Claude Touray et Christiane Sabouraud)¹. C'est Frey qui introduira en 1969 le concept d'anchizone, intermédiaire entre diagenèse et métamorphisme de bas degré (épizone), concept largement popularisé dans les ouvrages *Low Temperature Metamor-*

¹ Comme le rappellera fort justement Jacques Touret à la suite de cet exposé, cette décennie 70 fut l'âge florissant des Conférences de l'OTAN. Elles ont permis, en particulier sur le thème des interactions fluides-minéraux, des échanges réguliers et extrêmement féconds de chercheurs de part et d'autre de l'Atlantique, avec des personnalités comme Philip M. (Phil) Orville (1930-1980), Hans P. Eugster (1925-1987), George B. Skippen (1936-2019), Bernard W. Evans ou Harold C. (Hal) Helgeson (1931-2007), l'ETH Zürich servant souvent de tête de pont et les Alpes de terrain de jeu.

phism (FREY, 1987) et *Low-Grade Metamorphism* (FREY & ROBINSON, 1999). Un bon exemple du rôle de référence joué par ces études conduites dans des cadres tectoniques bien établis est la région de Glarus, dans les Alpes centrales externes. Cette zone célèbre pour son chevauchement de nappe l'est aussi pour une série d'études sur le passage anchizone–épizone et la mise en évidence par Frey (1988) d'un « métamorphisme inverse discontinu », c'est-à-dire transporté. C'est là aussi que TARANTOLA *et al.* (2007) élucident le mécanisme de passage de la zone à méthane à celle à fluide aqueux dominant, à 270 ± 5 °C. Une telle précision ferait sourire pour les estimations thermobarométriques classiques mais, là, la palette d'outils indépendants mis en jeu rend le résultat autrement convaincant. C'est donc dans de telles zones de référence que sont ensuite étalonnées des techniques nouvelles, comme l'extension vers les basses températures de la thermométrie Raman sur la matière carbonée (LAHFID *et al.*, 2010) ou une thermométrie fondée sur la nano-analyse des phyllosilicates en microscopie électronique en transmission (BOURDELLE *et al.*, 2018).

À degré métamorphique plus élevé, les fruits de la collaboration du tandem Bernard Evans – Volkmar Trommsdorff (1936-2005) sur le métamorphisme progressif des carbonates magnésiens et des roches ultrabasiques, des serpentinites jusqu'aux péridotites à grenat, font toujours référence. En particulier leur utilisation du laboratoire naturel pour déchiffrer les relations de phases et en tirer des données thermodynamiques, comme celles de l'amphibole anthophyllite, pour laquelle les résultats expérimentaux étaient ambigus. C'est par eux que des lieux comme Cima di Gagnone ou Alpe Arami sont devenus mythiques dans la communauté internationale. L'un par la démonstration que des péridotites à grenat, roches mantelliques par excellence, pouvaient aussi être le produit d'un métamorphisme progressif de matériel océanique (e.g. EVANS & TROMMSDORFF, 1978) ; l'autre par les controverses autour de la pression de formation de ses magnifiques péridotites à grenat (B.W. Evans contre Gary Ernst dans les années 70, Trommsdorff contre Larissa Dobrzhinetskaya et Harry W. Green (1940-2017) à la fin des années 90) : de 2 GPa à 7 GPa, les implications ne sont pas les mêmes ! Avec en corollaire une question qui travaille la communauté de manière

récurrente : les gneiss assez banals encaissant ces roches de haute pression, élogites ou autres, ont-ils partagé la même histoire d'enfouissement profond ? C'est dans la nappe de l'Adula que Heinrich (1982) apporte une réponse élégante, autour du rôle de l'eau, l'association la plus déshydratée restant métastable durant la décompression, alors que le gneiss encaissant se déshydrate. J'y reviendrai.

Et qu'en est-il des Alpes occidentales ?

Dans les zones externes d'abord : l'épopée de la carpholite

Après les remarquables découvertes de jadéite et de lawsonite à l'orée du XX^e siècle par Secondo Franchi (1859-1932), il faudra attendre la fin des années 1960 et le début des années 1970 pour voir apparaître les premières cartes de distribution de minéraux métamorphiques (prehnite, pumpellyite, laumontite, stilpnomélane, lawsonite, glaucophane, jadéite) dans les Alpes occidentales, grâce aux travaux de Jacqueline Desmons (1936-2017) et de Pierre Saliot, complétés par les observations de Jean-Michel Caron (1946-1996) et Renaud Caby. C'est le moment où Bruno Goffé, l'un des derniers étudiants de François Ellenberger, commence une thèse sur le métamorphisme en Vanoise avec l'appui de Pierre Saliot à l'École normale supérieure (ENS). Dans les bauxites métamorphisées du Dogger, Ellenberger avait signalé un minéral fibreux, non identifié. Goffé s'y attaque et l'identifie comme une variété magnésienne de la carpholite, minéral alors complètement anecdotique. Il s'agit d'un aluminosilicate de manganèse, à structure proche du pyroxène mais très riche en eau (12 % en poids), connu depuis le XIX^e siècle dans quelques gîtes hydrothermaux et dont une variété ferreuse avait été signalée dans les Célèbes (Indonésie) dans les années 1950. C'est le début d'une longue histoire, d'abord surtout alpine jusqu'au milieu des années 1980 : Goffé reconnaît la généralité des ferro- et magnésiocarpholites dans les niveaux alumineux de Vanoise, puis du Briançonnais ligure, mais aussi dans les schistes lustrés des Alpes cottiennes puis des Alpes centrales, puis jusqu'en Engadine ! Il identifie les associations importantes, à pyrophyllite, avec ou sans diaspore, avec ou sans chloritoïde. Car les carpholites ferreuses sont l'équivalent hydraté de chloritoïde + quartz ; elles précèdent l'apparition du chloritoïde dans un métamorphisme prograde.

Goffé établit ainsi les relations de phases dans les roches alumineuses, saturées ou non en silice. Grâce à ce génial chasseur de carpholite (et à des découvertes similaires en Crête par le groupe de Braunschweig), un minéral rarissime passe en quelques années au rang de minéral index du métamorphisme, étendant vers les basses températures et hautes pressions les relations de phases dans les métasédiments pélitiques, déjà si riches par ailleurs. C'est une petite révolution, que Goffé exporte ensuite hors des Alpes, mettant en évidence dans plusieurs régions un métamorphisme de type haute pression jusqu'alors inconnu. La décennie suivante le voit en effet trouver de la carpholite « partout », tout le long de la chaîne téthysienne depuis le Rif jusqu'en Oman. Puis, hormis la Nouvelle-Calédonie en 1993², il faudra attendre le nouveau millénaire pour assister à la découverte de carpholites dans d'autres orogènes, par ses élèves au Spitzberg en 2005, par d'autres en Asie centrale en 2007, dans les Caraïbes en 2011 et, enfin en Amérique du Nord, en Alaska en 2019.

Les découvertes de Goffé et sa connaissance du laboratoire naturel³ vont servir de base au développement de nouveaux outils pétrologiques dans les années 1990 et suivantes, grâce à plusieurs de ses élèves. Olivier Vidal étudie d'abord expérimentalement les relations de phases de la carpholite, du chloritoïde, de la sudoïte (une chlorite alumineuse souvent associée à la carpholite) et de la cookéite (chlorite lithinifère reconnue composant à part entière des métasédiments alumineux, où elle peut former avec le mica sodique paragonite un interstratifié régulier 1/1, la saliotite, GOFFÉ *et al.*, 1994) : puis il s'attaque à la thermodynamique des phyllosilicates, intégrant les contraintes expérimentales et naturelles dans une base cohérente de données. C'est la grande période de développement des bases de données thermodynamiques, qui ouvrent vraiment la pétrologie à la quantification – et les Alpes ne sont pas en reste, grâce aussi aux liens entre l'école

thermodynamique canadienne (Rob Berman) et des collègues suisses comme Martin Engi et Christian de Capitani (cf. ENGI *et al.*, 1995; TODD & ENGI, 1997). Sur le terrain, dans les schistes lustrés des Alpes cottiennes, Philippe Agard précise en les quantifiant les étapes du métamorphisme progressif de haute pression à bas degré, avec carpholite, lawsonite puis apparition du chloritoïde. Sa coupe au-dessus de Sestrières, du Fraitève au col de la Finestre, deviendra à son tour un laboratoire naturel de référence : avec un étalonnage reposant en partie sur cette coupe, Olivier Beyssac met au point un thermomètre (à maximum) fondé sur la graphitisation sous P et T de la matière carbonée, analysée par spectrométrie Raman (BEYSSAC *et al.*, 2002). Ce nouvel outil connaît un énorme succès dans l'étude des schistes lustrés et de la structure thermique de la chaîne, et bien au-delà (jusque dans l'industrie) tant sont communs les schistes de bas degré dépourvus de minéraux index. Grâce à sa précision, il révèle ou confirme des discontinuités métamorphiques dans les piles de nappes. Le travail de MANZOTTI *et al.* (2021) autour de la nappe de la Dent-Blanche est un bon exemple des possibilités de cette technique (Fig. 2) ; la thèse de Clément Herviou, récemment distinguée, est comme une culmination de cette approche « tectono-thermométrique », à l'échelle de la chaîne (HERVIOU *et al.*, 2022).

Dans les zones plus internes : la pression monte...

Les années 1960 sont celles de la reconnaissance des écloğites associées aux schistes bleus ; les figures en sont Peter Bearth (1902-1989), Giorgio Vittorio Dal Piaz et Jean-Robert Kiénast. Dès 1959 les observations de Bearth autour de Zermatt montrent l'origine métamorphique des écloğites, provenant de la transformation de gabbro ou de basalte en coussin. Elles ne sont donc pas nécessairement d'origine mantellique, un résultat qui s'impose peu après avec d'autres observations en

² Par BLACK *et al.* (1993). Pour la petite histoire, vers 1990, lors de la réaffectation du pavillon Fallot (Meudon) par le Collège de France, Goffé et Christian Robert y découvrent une collection d'échantillons néocalédoniens datant de la thèse d'André Arnould (1958, conduite sous l'égide de Pierre Routhier [1916-2008]). Stupeur, Goffé y identifie un bel échantillon de Mg-Fe-carpholite ! C'est une « première » mais l'absence de localisation ne lui permettra pas d'aller plus loin...

³ Il est une autre découverte notable de Goffé en Vanoise, bien dans l'esprit d'Ellenberger qui y avait montré qu'une stratigraphie restait possible en dépit de la forte empreinte métamorphique : la présence d'hydrocarbures dans ces roches métamorphiques, alors que les températures atteintes excèdent largement celles de la fenêtre à huile. C'est encore une découverte inattendue, quasi hérétique ; elle lui permet de démontrer le rôle inhibiteur de la pression dans le craquage des huiles, et l'importance de la durée de chauffe – et induit ainsi la thèse d'Olivier Beyssac sur la graphitisation. Dans la même veine, les microstructures végétales très finement fossilisées décrites par Ellenberger servirent de tremplin à Sylvain Bernard, autre étudiant de Goffé, pour une belle carrière dans la biominéralogie et la biogéochimie.

Norvège et les travaux de Robert G. Coleman (1923-2020) dans la zone circumpacifique.

Un évènement majeur est la découverte de jadéite dans les métagranites de la Zone Sesia (COMPAGNONI & MAFFEO, 1973). Majeur, car la réaction albite = jadéite + quartz est maintenant bien établie expérimentalement, avec donc

l'implication que les granites de Sesia, unité continentale, ont connu des enfouissements d'au moins 30 à 40 km. Surcharge impossible pour certains⁴. C'est le moment où le granite du Monte Mucrone devient un haut lieu et Sesia un « spot » géologique où se multiplient les études – et où je n'irai donc pas.

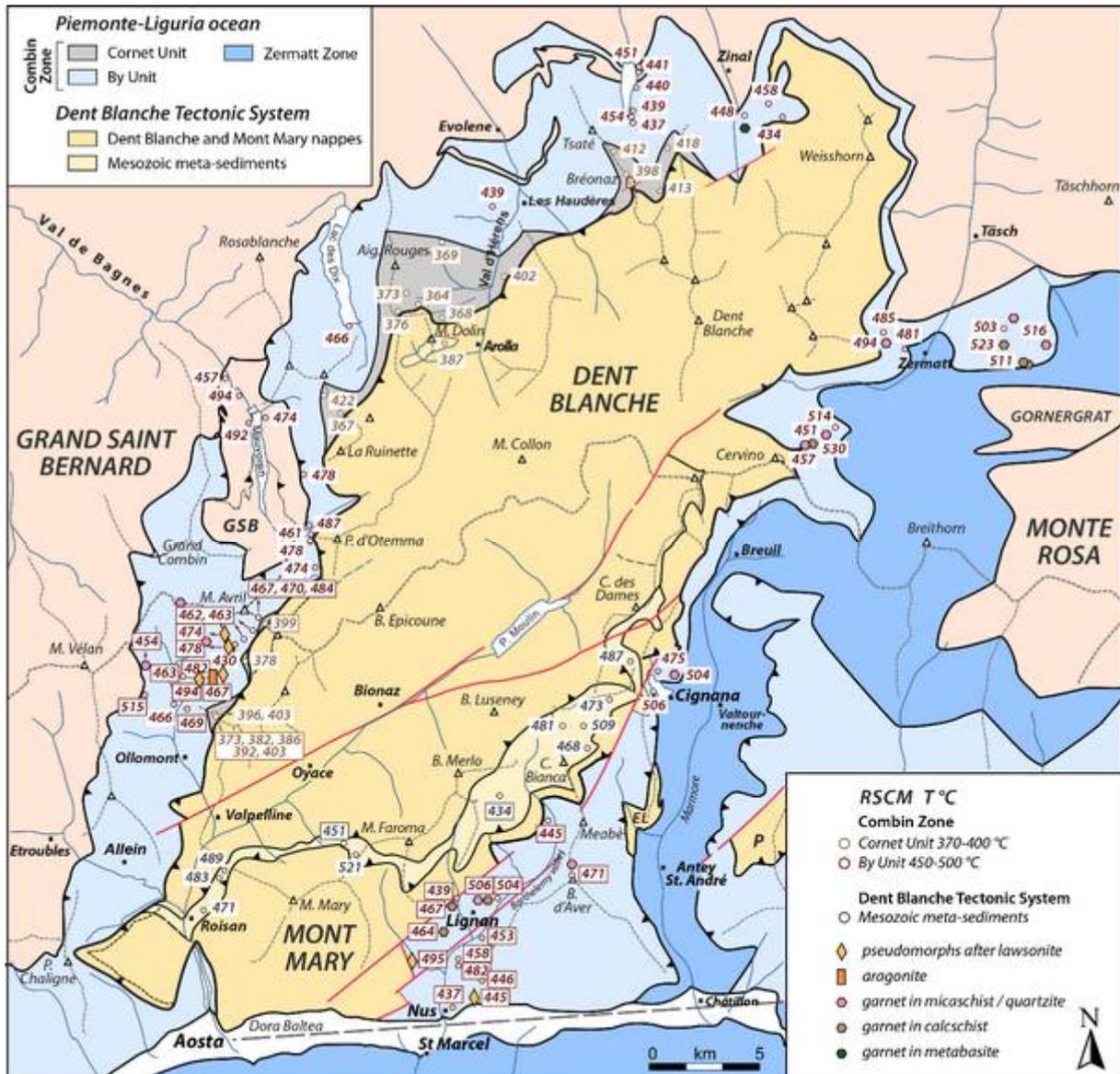


Fig. 2. Carte métamorphique et structurale des schistes lustrés sous la nappe de la Dent-Blanche (MANZOTTI *et al.*, 2021). Un exemple d'application de la thermométrie par microspectrométrie Raman sur la matière organique (RSCM), qui révèle dans la Zone du Combin une unité froide (du Cornet) en semelle ouest de la nappe, et un gradient latéral dans l'unité de By.

⁴ L'un de mes souvenirs d'étudiant, à un premier congrès (1978 ?), est celui de Roberto Compagnoni bataillant avec des géologues structuralistes pour faire admettre de telles pressions et leurs implications.

J'ai en plus un problème avec les roches basiques et les éclogites. En ces années 1970, on admet bien que ces dernières ne sont pas seulement mantelliques. Certes, dans les vieux socles, la plupart sont à disthène et souvent associées à des péridotites. Mais ailleurs il en est d'autres, sans disthène, souvent associées à des schistes bleus, qui sont manifestement d'origine métamorphique (Zermatt, Sesia, la chaîne franciscaine, cf. *supra*). Le statut de faciès de cette roche dense n'est pas encore très clair ; pour certains il pourrait refléter davantage l'absence d'eau que des conditions de pression différentes des schistes bleus. De fait, les éclogites ne se prêtent alors qu'à des estimations de pression très grossières, limitées à un minimum d'une dizaine de kilobars par la réaction albite = jadéite + quartz, qu'il faut, en plus, appliquer à un pyroxène sodique, l'omphacite, lequel ne contient que 50% environ de jadéite.

L'illumination vient avec le travail de thèse de Tim Holland, en 1977 à Oxford⁵, que je vois encore maintenant comme une étape décisive. Ce travail de terrain alpin (dans les Hohe Tauern) et expérimental (sur la limite supérieure de stabilité en pression du mica sodique paragonite) apporte la réponse aux deux interrogations. Il démontre que les éclogites y sont clairement métamorphiques, associées à des métasédiments isofaciaux, et formées en présence d'un fluide aqueux, en particulier dans des veines. Surtout, l'instabilité de la paragonite, formant jadéite + disthène + H₂O à des pressions supérieures à environ 20 kbar, donne enfin une signification et une valeur barométrique à la présence de disthène dans certaines éclogites. Les implications sont lourdes car la gamme de pression a doublé pour les éclogites à disthène, qui prennent une signification nouvelle. Magnifique !

La même année, je soutiens ma thèse de 3^{ème} cycle sur la Haute Maurienne⁶. Le principal résultat concerne les compositions pélitiques, avec la découverte récurrente de talc associé au mica

blanc phengite, au grenat ferreux ou au chloritoïde. Ces associations paradoxales d'un minéral sans aluminium et réputé magnésien (le talc) avec un minéral très alumineux et réputé ferreux (le chloritoïde) impliquent l'instabilité de chlorite + quartz, association très banale, jusqu'à pouvoir former dans les compositions les plus magnésiennes l'association talc + disthène, documentée dans les métagabbros éclogitiques de l'Allalinhorn, au-dessus de Zermatt (CHINNER et DIXON, 1973) et en 1977 par Christine Miller dans la Zone éclogitique des Hohe Tauern. Ces associations inhabituelles dans des roches de composition banale impliquaient des conditions de formation inhabituelles, pour la pression en particulier. Ce qui permettait de faire l'hypothèse que les teneurs en magnésium inhabituelles du chloritoïde dans ces associations étaient un effet des hautes pressions. Hautes, mais de combien ?! L'extrême prudence avec laquelle je m'avance alors sur le plan quantitatif (« de 7 à 13 kbar ») est révélatrice de la faiblesse de nos outils...

Alors quoi de mieux comme « post-doc » que d'étudier expérimentalement la stabilité du pôle magnésien du chloritoïde [sous réserve qu'il existe...]? Ceci permettrait de quantifier les relations de phases révélées dans les métapélites de haute pression. Et où mieux qu'à l'université de la Ruhr, où Werner Schreyer (1930-2006) avait, le premier, décrit une association talc-phengite (en 1976) et surtout en 1973 la paire talc-disthène, qu'il avait prédite être un équivalent de haute pression de la cordiérite ou de chlorite + quartz ? Il avait même forgé en 1977 le terme de *whiteschist* pour les roches contenant cet indicateur de haute pression. En route donc pour Bochum, qui était devenu une Mecque de la pétrologie expérimentale et en particulier de l'étude du système concerné, MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O, MASH pour les intimes. Schreyer, le grand patron, a toujours conservé une curiosité et un enthousiasme juvéniles. Excellent observateur, passionné par les miné-

⁵ HOLLAND (1979 a et b).

⁶ Mon directeur de thèse était sur le papier Gérard Guitard (1925-2009), mais de fait Pierre Saliot. Ce dernier et Jean-Robert Kiénast m'avaient installé pour un DEA en Haute Maurienne, aux confins de leurs domaines respectifs, sur la bordure ouest du massif du Grand-Paradis. J'ai apprécié l'honneur que me fit Guitard d'une visite sur le terrain, lui l'homme des Pyrénées dont les beaux articles avec Michel Fontelles me nourrissaient. Il me confia plus tard la réflexion qu'il se fit *in petto* lors de cette visite : « *Le pauvre garçon, mais que va-t-il pouvoir faire là ?!* ». Il était minéralogiste dans l'âme ; par exemple, me voyant étudier des métasédiments manganésifères : « *Mon cher Chopin, peut-être vous faudra-t-il avoir à l'esprit la galaxite* » — spinelle rarissime, MnAl₂O₄, dont je n'avais pas la moindre notion (comme beaucoup sans doute !) et que je finis effectivement par trouver, en grains micrométriques. Il se réjouissait aussi que, pour mesurer l'angle 2V de pyroxénoïdes manganeux, je lui donne l'occasion de ressortir la platine théodolite qu'il avait reçue de l'abbé Bordet (1914-1996).

raux et roches métamorphiques (qu'il rapporte par quintaux du monde entier), c'est de l'étude de l'objet naturel qu'il nourrit ses projets expérimentaux. Je m'y retrouve tout à fait, et jouis de sa confiance. Jusqu'à fin 1981 (puis en 1983 et en 1986), c'est pour moi une période extrêmement formatrice, riche de beaucoup de liens avec la communauté pétrologique allemande, et d'une liberté excitante à explorer un système chimique bien connu mais dans un domaine de température quasi vierge (450–700°C) pour les pressions auxquelles je travaille (15 à 40 kbar). Grâce à la synthèse du Mg-chloritoïde et de la Mg-carpholite, c'est tout un nouveau domaine de relations de phases qui est défriché dans MASH (CHOPIN et SCHREYER, 1983) et donc ouvert à la quantification. Je peux en faire une première application au *whiteschist* à magnésiochloritoïde trouvé entretemps dans le massif du Mont-Rose : de 16 à 18 kbar, selon l'activité de H₂O...

À Bochum, mes camarades de paillasse et piliers de la salle des presses sont Peter Mirwald, expérimentateur confirmé passé à UCLA par le laboratoire de George C. Kennedy (1919-1980, pionnier flamboyant des hautes pressions), et Hans-Joachim Massonne, thésard dont le grand œuvre sera la calibration expérimentale de la substitution phengitique dans la muscovite [et la découverte de diamant métamorphique dans les Monts métallifères en 1999, mais j'anticipe]. Tous les deux travaillent à l'une des meilleures déterminations de la transition quartz-coesite, réaction utilisée classiquement pour l'étalonnage des cellules de pression ; Mirwald travaille aussi sur la stabilité de la cordiérite à haute pression, et Massonne sur la stabilité des chlorites et du talc, en arrière-plan de celle des phengites. C'est dire que le système MASH est vraiment notre pain quotidien.

Je suis embauché au CNRS⁷, dans l'équipe de Martine Lagache. Retour à Paris début 1982. Il est devenu clair que les schistes magnésiens sont des systèmes réactifs et sensibles à haute pression, avec des relations de phases diversifiées qui doivent permettre de suivre de subtiles variations de P et T. Je vais donc continuer à les chercher dans les Alpes⁸. Je connais ceux du massif du

Grand-Paradis, les mêmes dans le massif du Mont-Rose (mais avec des chloritoïdes plus magnésiens et talc + disthène, suggérant des conditions un peu plus élevées), je me tourne donc assez naturellement vers le troisième massif cristallin interne des Alpes occidentales, Dora-Maira, que je ne connais pas. L'ouvrage de référence est la thèse d'État de Pierre Vialon (1966). Une lecture attentive ne révèle rien qui puisse évoquer les schistes magnésiens à chloritoïde (*micascisti argentei*) des deux autres massifs. Mais Vialon décrit une roche bizarre qu'il qualifie de « pegmatite noduleuse » pour la taille centimétrique du mica blanc et décimétrique de nodules rose très pâle – qu'il analyse et identifie comme du grenat pyrope, très proche du pôle magnésien. C'est invraisemblable, totalement invraisemblable ! Je m'étais frotté au pyrope dans MASH, vers 750 °C, 30 à 42 kbar en encadrant la réaction Mg-chloritoïde = pyrope + corindon + H₂O. Le système MASH est l'un des mieux connus et le pyrope y est clairement une phase de haute pression et haute température, des conditions qui n'ont RIEN à voir avec ce que l'on savait du métamorphisme alpin. Les estimations les plus élevées, dans la Zone Sesia, atteignaient tout au plus 500-600 °C, 15 kbar. Il me paraissait plausible que Vialon se soit trompé, mais la cohérence de ses descriptions me laissait un doute ; je gardais donc le fol espoir qu'il ne se soit pas trompé, parce qu'alors ce serait un coup phénoménal, comme... un morceau de lune au milieu des Alpes. Il fallait trouver ces roches !

Octobre 1982, depuis un an au CNRS je partage à nouveau le bureau de Goffé à l'ENS ; lui étend sa chasse à la carpholite dans les schistes lustrés (Val Maira) et le Briançonnais ligure. Je l'accompagne en demandant absolument à passer une journée dans Dora-Maira pour trouver les roches de Vialon. Affaire conclue... et nous partons dans son minibus avec William M. (Bill) Murphy (1952-2021), un doctorant que Helgeson a confié à Martine Lagache pendant l'année sabbatique qu'il passe en Europe. La mission avance, carpholite le jour, bivouac la nuit, jusqu'à ce que nous arrivions enfin au débouché de la vallée du Pô. Vialon a mentionné un bel affleurement mais n'a donné que son altitude, et nous n'avons pas de carte topographique... Il nous faut donc trouver

⁷ Sur un projet assez fumeux, expérimental sans être de haute pression et qui n'a rien d'alpin. Il semblait politiquement trop risqué de jouer un affichage alpin, peu d'années après le recrutement de Bruno Goffé...

⁸ Le projet CNRS est assez vite oublié, avec la bénédiction de Bruce Velde, mon parrain officiel. Merci Bruce !

un chemin qui monte assez haut dans ces pentes boisées, au-dessus de Martiniana Po. Premier essai, demi-tour, un deuxième peut-être, puis nous suivons un chemin qui monte plus allègrement et finissons par nous arrêter devant un petit pont de rondins qui n'inspire pas confiance, et l'altitude est correcte (860 m). Après une heure ou deux sur les sentiers alentour, nous avons vu beaucoup de gneiss mais rien qui évoque l'image que nous pouvons nous faire d'une roche à gros grenats. Retour piteux à la voiture et, par acquit de conscience, nous jetons un coup d'œil plus attentif au gros bloc clair qui en est le plus proche. Sous les lichens se découvrent des sections blanchâtres, sub-circulaires, décimétriques. Ce serait donc ça ? Un peu plus haut dans la pente les échantillons sont frais, le doute n'est plus permis : c'est bien du grenat, presque incolore, énorme. Vialon avait raison !

C'est dans les grenats de cette roche (les petits, non les gros) que j'identifie dans les semaines suivantes la coesite, polymorphe de haute pression du quartz, stable au-dessus de 25 à 30 kbar selon la température. Ce sera le début d'une nouvelle histoire, celle du métamorphisme de très haute pression, devenu *ultrahigh pressure metamorphism (UHP)* à la suite de COLEMAN et WANG (1995).

Quelques réflexions sur cette découverte

L'hypothèse coesite m'est vite venue, en voyant sous le microscope, en inclusion dans les grenats, une phase réfringente (donc dense ?) se transformer en ce qui ressemblait bien à du quartz... D'autant plus que la présence de fractures radiales affectant le grenat autour de ces inclusions suggérerait leur augmentation de volume. Le test était facile à faire avec la microsonde électronique dont disposait le laboratoire : les deux phases aux propriétés distinctes étaient bien toutes les deux de la silice pure. Jubilation ! *A posteriori*, il est clair que j'étais préconditionné pour cette découverte à la fois par le travail expérimental dans le système MASH à haute pression, où coesite et pyrope était de notre univers quotidien, et par ma formation alpine, pour revenir au terrain. Une fois confirmée la présence de pyrope pur dans ces roches – qui me paraissait *a priori* invraisemblable, il n'était plus invraisemblable de penser à la coesite. C'est toute la différence avec Vialon et ses contemporains à qui il avait distribué des échantillons, sans suite... Vialon m'écrit (en 2019) : « *Lorsque je l'ai*

découvert [le pyrope], et même après sa détermination précise, je n'ai pas su qu'en faire ». Le contexte de la découverte est donc essentiel pour sa réception. Je ne dirai pourtant pas pour autant qu'on trouve ce que l'on cherche ; la curiosité est un moteur efficace de la sérendipité. « *La joie de connaître* », chère à Pierre Termier et à François Ellenberger !

L'acceptation fut immédiate, me semble-t-il, après que j'ai présenté la découverte au printemps 1983 à la réunion de l'EUG (European Union of Geosciences, alors à Strasbourg) puis en septembre à la Conférence Penrose « Blueschists and Eclogites » réunie par Bernard Evans dans l'état de Washington. C'était « trop », trop beau, trop simple, trop incontestable : gros minéraux, belles textures, compositions très proches du système expérimental, réaction univariante (quartz = coesite) qui ne met pas de solutions solides en jeu.

Ces conditions ne rendent que plus grand le mérite des découvreurs suivants, en particulier David C. Smith et Thomas Reinecke. Dans des éclogites de Norvège en 1984 et dans des sédiments manganésifères éclogitisés au lac de Cignana (Val d'Aoste) en 1991, ce sont de rares et minuscules inclusions de coesite qu'ils ont réussi à identifier optiquement. Quels pétrographes ! De plus, la découverte alpine de Reinecke était la première dans une série d'origine océanique. Le cas de la Norvège illustre bien un autre problème, la reproductibilité de l'observation. Pendant plus d'une décennie personne ne fut capable de retrouver la coesite en Norvège, terrain pourtant fort couru ; ceci au point que la crédibilité de Smith était mise en cause. Il fallut attendre 1997 pour que l'œil neuf de la doctorante Alice Wain (1973[?]-2000) y multiplie les découvertes et rétablisse justice.

Pour revenir à Dora-Maira, si la découverte était incontestable, elle posait d'innombrables questions. Les pressions isotropes du système expérimental s'appliquaient-elles à cette roche ? Y avait-il alentour d'autres phases ou associations d'aussi haute pression ? Comment cette roche formée à une centaine de kilomètres de profondeur avait-elle pu arriver aussi fraîche à la surface ? Était-elle d'âge alpin ? Que faisait-elle là, dans un massif que rien par ailleurs ne distinguait de ses homologues alpins ? Était-ce une simple lentille dans un encaissant de plus basse

pression, ou le premier témoin d'une véritable unité métamorphique, encore à découvrir et à cartographier ? Si tel était le cas, cela impliquait que la croûte continentale pouvait aussi être subduite ! Rien d'étonnant donc à ce que le massif Dora-Maira ait vu depuis se succéder les études structurales, pétrologiques, minéralogiques, radiochronologiques et géochimiques, toujours renouvelées avec l'apparition de nouvelles méthodes. Il est devenu un laboratoire naturel de plus dans les Alpes, pour les très hautes pressions, comme l'étaient Cima di Gagnone et Alpe Arami dans les Alpes centrales – et comme le deviendront la minuscule unité du lac de Cignana en Val d'Aoste, son pendant océanique, et le massif de Pohorje (Slovénie) dans les Alpes orientales [où du microdiamant sera découvert dans les deux cas en 2015].

Quels en sont les principaux enseignements, de portée générale ?

D'abord la découverte d'une minéralogie de haute pression insoupçonnée⁹.

Ensuite, l'existence d'une unité métamorphique UHP cohérente, d'extension plurikilométrique, ayant atteint des conditions dépassant 700 °C et 30 kbar. La cohérence des conditions enregistrées par quelques boudins ou lentilles de roche de HP/UHP et par leur encaissant est un débat récurrent, que ce soit pour les éclogites et périodites des vieux socles (Norvège, Bohême, nappe de l'Adula ou Cima di Gagnone dans les Alpes centrales) ou pour les *knockers*, ces blocs emballés dans une matrice schisteuse de la Formation franciscaine (Californie). Dans le massif Dora-Maira, la présence à l'intérieur de limites cartographiables d'indicateurs de UHP dans les roches à pyrope mais aussi dans une variété de lithologies (métabasites, métapélites, marbres, et jusque dans les métagranites qui font l'essentiel de l'encaissant) démontrait la cohérence de l'ensemble – comme ce fut le cas aussi dans la nappe

de l'Adula et à Cima di Gagnone (PICCOLI *et al.*, 2022). Ainsi Dora-Maira est le premier domaine UHP où cette cohérence fut établie et cartographiée, ce qui en a fait l'exemple canonique des « petites unités UHP »¹⁰, par opposition aux immenses domaines UHP des Gneiss de l'ouest en Norvège ou du Dabie Shan en Chine.

Dans cette unité UHP du Sud de Dora-Maira, le contenu lithologique est le même que celui des unités sus-jacentes « simplement éclogitiques » (environ 500 °C, 15 kbar, à quartz), à base de gneiss. Il s'agit donc bien d'un lambeau de croûte continentale supérieure ; son passage par des conditions UHP démontre l'existence de la subduction continentale, un concept introduit à cette occasion et aux implications multiples.

Quant au mécanisme et à la vitesse d'exhumation de cette croûte subduite, les datations laissent à peine quelques millions d'années entre le pic d'enfouissement et le refroidissement à environ 200 °C (GEBAUER *et al.*, 1997), ce qui implique des vitesses de 2 à 3 cm/an. Il s'agit clairement de vitesse de plaques et d'un processus tectonique, un résultat confirmé par ailleurs. Érosion et extension, souvent invoquées, ne sont pas à la hauteur.

La conversion de ces hautes pressions (obtenues sur la base de travaux expérimentaux réalisés en conditions hydrostatiques) en profondeurs d'enfouissement repose sur l'hypothèse d'une pression lithostatique, donc de contraintes déviatoriques négligeables. Hypothèse classique, que pouvait justifier pour Dora-Maira la taille et la texture des minéraux ainsi que la température élevée, favorisant la relaxation des contraintes. Depuis deux décennies un groupe actif entretient le questionnement de cette hypothèse sur la base de modèles mécaniques ; il veut voir dans ces roches de HP/UHP, souvent dans un encaissant gneissique banal, un effet, non pas de pression lithostatique élevée, mais de contraintes déviatoriques locales liées à des contrastes rhéologiques¹¹. De

⁹ Avec, en inclusion dans les gros pyropes, les pôles magnésiens de la staurotite, du chloritoïde, de la dumortierite et un minéral prismatique violet, inconnu, que j'eus le plaisir de décrire et dédier à François Ellenberger en 1986. C'est d'ailleurs encore la seule occurrence mondiale d'ellenbergerite, alors que sa composition est proche d'une chlorite magnésienne donc banale – ce qui atteste des conditions de formation inhabituelles. De même parmi les minéraux accessoires, avec les nouveaux phosphates bearthite, phosphoellenbergerite et hydroxywagnerite.

¹⁰ La découverte par MANZOTTI *et al.* (2022) dans le nord du massif Dora-Maira d'une autre unité à coesite, nettement plus froide (le chloritoïde ferreux y est encore stable), échantillonnant donc un autre stade de la subduction, illustre brillamment ce rôle de laboratoire naturel.

¹¹ Le seul fait que l'on puisse tracer une limite cartographique pour une unité UHP me paraît suffire à réfuter cette hypothèse. D'autant plus lorsque cette limite correspond aussi à un saut de température.

telles contraintes doivent exister, mais excèdent-elles la résolution de nos géobaromètres ? La tentative la plus aboutie de passer de ces modèles à l'objet naturel nous ramène encore aux Alpes, avec les *whiteschists* du Sud du Mont-Rose (LUISIER *et al.*, 2019)...

Enfin, la découverte des inclusions de coesite dans les pyropes alpins a permis de réaliser qu'elles restent pressurisées tant que l'hôte n'éclate pas autour d'elles, permettant leur conservation jusqu'à basse pression ambiante. Cela a donné une nouvelle vie à l'approche mécanique du comportement d'une inclusion minérale dans un hôte cubique, grenat ou diamant. Les bases en avaient été posées au début des années 1960 par John Rosenfeld (1920-2020), qu'il avait tenté de relancer dix ans plus tard, sans meilleur écho¹². Deux à trois décennies plus tard, le développement de la physique des hautes pressions et la popularisation des microspectromètres Raman (donnant accès à la pression résiduelle dans une inclusion) ont conduit cette thermobarométrie élastique à un haut degré de raffinement et de prospérité. L'hypothèse de base est un comportement élastique (et non plastique) du système, mais l'énorme avantage est d'être libéré de toute hypothèse sur l'obtention de l'équilibre chimique. Bien évidemment, les roches alpines sont parmi les premières utilisées pour tester cette hypothèse élastique.

En guise de conclusion : capitalisation

Ce survol des avancées pétrologiques permises par l'étude des Alpes est évidemment trop

personnel et biaisé vers les hautes pressions. Il ne doit pas faire oublier que les Alpes sont aussi une terre d'élection de l'étude des interactions fluides-roches et de leur cinétique, que ce soit dans l'anchizone (cf. *supra*), dans les veines alpines bien sûr, mais aussi à haut degré, par exemple dans l'auréole du granite intrusif de Bergell, autre fameux laboratoire naturel.

L'effet de capitalisation des connaissances sur cette chaîne étudiée depuis l'aube de la géologie paraît évident. Prétendre que les Alpes sont très bien connues et que mieux vaut aller voir ailleurs pour de belles découvertes serait ignorer cet effet de capitalisation. Les connaissances multidisciplinaires (cartographiques, stratigraphiques, pétrographiques, géochimiques, tectoniques, structurales, géophysiques, géodésiques, etc...) acquises, publiées, synthétisées et réévaluées depuis 200 ans, issues du terrain et associées aux technologies de l'expérimentation, de l'analyse et de la modélisation, font des Alpes un domaine géologique exceptionnel. Tout nouveau résultat y profite immédiatement de ce corpus de connaissances pour sa valorisation, ce qui n'est pas le cas d'une découverte faite « au milieu de nulle part », aussi belle soit elle.

Remerciements

Ma gratitude va à Gaston Godard et Philippe Grandchamp, pour leur invitation, leurs encouragements amicaux et leurs relectures, ainsi qu'à Bruno Goffé pour ses corrections et apports à cette note et, surtout, pour les si riches années de compagnonnage alpin.

Bibliographie

AGARD, P., LABROUSSE, L., ELVEVOLD, S. et LEPVRIER, C. (2005). Discovery of Paleozoic Fe-Mg carpholite in Motalafjella, Svalbard Caledonides: A milestone for subduction-zone gradients. *Geology*, **33**, p. 761-764.

BEARTH, P. (1959). Über Eklogite, Glaukophanschiefer und metamorphe Pillowlaven. *Bull. suisse Minéral. Pétrogr.*, **39**, p. 267-286.
BEYSSAC, O., GOFFE, B., CHOPIN, C. et ROUZAUD, J.N. (2002). Raman spectra of

¹² Motivées par cette découverte de coesite, deux études menées complètement indépendamment proposent peu après un modèle mécanique d'une inclusion solide subissant une transition de phase dans son hôte cubique ; elles en montrent le potentiel thermobarométrique, tout en expliquant les textures observées dans et autour des inclusions de coesite (GILLET *et al.*, 1984 ; VAN DER MOLEN *et al.*, 1986). C'était le début d'une nouvelle histoire, dont l'étape suivante fut la démonstration par spectrométrie Raman, dans des inclusions de coesite du Kazakhstan, de l'existence de la forte pression résiduelle prédite par ces modèles (PARKINSON & KATAYAMA, 1999). Les chapitres suivants sont constitutifs de la thermobarométrie élastique, avec le réexamen méthodique et radical de la question, aussi bien du point de vue théorique, que pratique, instrumental et expérimental par le groupe réuni en Italie du nord autour de Ross J. Angel et Matteo Alvaro, toujours à l'œuvre. Impressionnant !

- carbonaceous material in metasediments: a new geothermometer. *J. metamorphic Geol.*, **20**, p. 859-871.
- BLACK, P.M., MAURIZOT, P., GHENT, E.D. et STOUT, M.Z. (1993). Mg-Fe carpholite from aluminous schists in the Diahot region and implications for preservation of high-pressure/low-temperature schists, northern New Caledonia. *J. Metamorphic Geol.*, **11**, p. 455-460.
- BOURDELLE, F., BEYSSAC, O., PARRA, T. et CHOPIN, C. (2018). Nanoscale chemical zoning of chlorite and implications for low-temperature thermometry: application to the Glarus Alps (Switzerland). *Lithos*, **314-315**, p. 551-561.
- BOUSQUET, R., OBERHÄNSLI, R., SCHMID, S.M., ZEILINGER, G., ROBERT C., MÖLLER, A., BERGER, A., WIEDERKEHR, M., ROSENBERG, C. et KOLLER, F. (2012). Metamorphic map of the Alps, 1:1 000 000. Commission de la Carte géologique du Monde, Paris.
- BUCHER, K. et DROOP, G. (1983). The metamorphic evolution of garnet cordierite-sillimanite-gneisses of the Gruf-complex, Eastern Pennine Alps. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **84**, p. 215-227.
- CHINNER, G.A. et DIXON, J.E. (1973). Some high-pressure parageneses of the Allalin gabbro, Valais, Switzerland. *J. Petrol.*, **14**, p. 185-202.
- CHOPIN, C. (1984). Coesite and pure pyrope in high-grade blueschists of the Western Alps: a first record and some consequences. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **86**, p. 107-118.
- CHOPIN, C. et SCHREYER, W. (1983). Magnesio-carpholite and magnesiochloritoid: two index minerals of pelitic blueschists and their preliminary phase relations in the model MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O. *Amer. J. Sci.*, Orville volume **263A**, p. 72-96.
- COLEMAN, R.G. et WANG, X. (1995). *Ultrahigh Pressure Metamorphism*. Cambridge University Press, 540 p.
- COMPAGNONI, R. et MAFFEO, B. (1973). Jadeite-bearing metagranite l.s. and related rocks in the Monte Mucrone area (Sesia-Lanzo zone, Western Italian Alps). *Bull. suisse Minéral. Pétrogr.*, **53**, p. 355-378.
- ENGI, M., TODD, C.S. et SCHMATZ, D.R. (1995). Tertiary metamorphic conditions in the eastern Lepontine Alps. *Bull. suisse Minéral. Pétrogr.*, **75**, 347-369.
- EVANS, B.W. et TROMMSDORFF, V. (1978). Petrogenesis of garnet lherzolite, Cima di Gagnone, Lepontine Alps. *Earth planet. Sci. Lett.*, **40**, p. 333-348.
- FRANCHI, S. (1900). Sopra alcuni giacimenti di rocce giadeitiche nelle Alpi Occidentali e nell'Apennino ligure. *Boll. Regio Comitato Geol. Italia*, **31**, p. 119-158.
- FREY, M. (1969). Die Metamorphose des Keupers vom Tafeljura bis zum Lukmanier-Gebiet. *Beitr. Geol. Karte Schweiz*, **137**, 160 p.
- FREY, M. (1987). *Low Temperature Metamorphism*. Blackie, Glasgow, x+351 p.
- FREY, M. (1988). Discontinuous inverse metamorphic zonation, Glarus Alps, Switzerland: evidence from illite "crystallinity" data. *Bull. suisse Minéral. Pétrogr.*, **68**, p. 171-183.
- FREY, M. et FERREIRO MÄHLMANN, R. (1999). Alpine metamorphism of the Central Alps. *Bull. suisse Minéral. Pétrogr.*, **79**, p. 135-154. <http://doi.org/10.5169/seals-60202>
- FREY, M. et ROBINSON, D. (1999). *Low-Grade Metamorphism*. Blackwell, London, 313 p.
- FREY, M., BUCHER, K., FRANK, E. et MULLIS, J. (1980a). Alpine metamorphism along the geotransverse Basel-Chiasso - a review. *Eclogae geol. Helv.*, **73**, p. 527-546.
- FREY, M., TEICHMÜLLER, M., TEICHMÜLLER, R., MULLIS, J., KUNZI, B., BREITSCHMID, A., GRUNER, U. et SCHWIZER, B. (1980b). Very low-grade metamorphism in external parts of the Central Alps: Illite crystallinity, coal rank and fluid inclusion data. *Eclogae geol. Helv.*, **73**, p. 173-203.
- FREY, M., DESMONS, J. et NEUBAUER, F. (1999). The new metamorphic map of the Alps: Introduction. *Bull. suisse Minéral. Pétrogr.*, **79**, p. 1-4 et annexe. <https://www.e-periodica.ch/digbib/view?pid=smp-001:1999:79::9#525>
- GEBAUER, D., SCHERTL, H.-P., BRIX, M. et SCHREYER, W. (1997). 35 Ma old ultrahigh-pressure metamorphism and evidence for very rapid exhumation in the Dora Maira Massif, Western Alps. *Lithos*, **41**, p. 5-24.
- GILLET, P., INGRIN, J. et CHOPIN, C. (1984). Coesite in subducted continental crust: P-T history deduced from an elastic model. *Earth planet. Sci. Lett.*, **70**, p. 426-436.
- GOFFE, B., BARONNET, A. et MORIN, G. (1994). La saliotite, interstratifié régulier 1:1 cookeite/paragonite. Nouveau phyllosilicate du métamorphisme de haute pression et basse température. *Eur. J. Mineral.*, **6**, p. 897-911.

- HEINRICH, C. (1982). Kyanite-eclogite to amphibolite facies evolution of hydrous mafic and pelitic rocks, Adula nappe, Central Alps. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **81**, p. 30-38.
- HERVIOU, C., AGARD, P., PLUNDER, A., MENDES, K., VERLAGUET, A., DELDICQUE, D. et CUBAS, N. (2022). Subducted fragments of the Liguro-Piemont ocean, Western Alps: Spatial correlations and offscraping mechanisms during subduction. *Tectonophysics*, **827**, p. 229-267.
- HOLLAND, T.J.B. (1979a). High water activities in the generation of high pressure kyanite eclogites of the Tauern Window, Austria. *J. Geol.*, **87**, 1-27.
- HOLLAND, T.J.B. (1979b). Experimental determination of the reaction paragonite = jadeite + kyanite + H₂O, and internally consistent thermodynamic data for part of the system Na₂O-Al₂O₃-SiO₂-H₂O, with applications to eclogites and blueschists. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **68**, p. 293-301.
- LAHFID, A., BEYSSAC, O., DEVILLE, E., NEGRO, F., CHOPIN, C. et GOFFE, B. (2010). Evolution of the Raman spectrum of carbonaceous material in low-grade metasediments of the Glarus Alps (Switzerland). *Terra Nova*, **22**, p. 354-360. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2010.00956.x>
- LUISIER, C., BAUMGARTNER, L., SCHMALHOLZ, S.M., SIRON, G. et VENNEMANN, T. (2019). Metamorphic pressure variation in a coherent Alpine nappe challenges lithostatic pressure paradigm. *Nature Comm.*, **10**, p. 1-11.
- MANZOTTI, P., BALLEVRE, M., PITRA, P. et SCHIAVI, F. (2021). Missing lawsonite and aragonite found: *P-T* and fluid composition in metamarls from the Combin Zone (Western Alps). *Contrib. Mineral. Petrol.*, **176** : 60. <https://doi.org/10.1007/s00410-021-01818-0>
- MANZOTTI, P., SCHIAVI, F., NOSENZO, F., PITRA, P. et BALLEVRE, M. (2022). A journey towards the forbidden zone: a new, cold, *UHP* unit in the Dora-Maira Massif (Western Alps). *Contrib. Mineral. Petrol.*, **177** : 59, <https://doi.org/10.1007/s00410-022-01923-8>
- MILLER, C. (1977). Chemismus und phasenpetrologische Untersuchungen der Gesteine aus der Eklogitzone des Tauernfensters, Österreich. *Tschermaks mineral. petrogr. Mitt.*, **24**, p. 221-277.
- NIGGLI, E. (1960). Mineral-Zonen der alpinen Metamorphose in den Schweizer Alpen. Int. Geol. Congr. XXI Session Norden, Kopenhagen, p. 132-138.
- NIGGLI, E. et NIGGLI, C. (1965). Karten der Verbreitung einiger Mineralien der alpidischen Metamorphose in den Schweizer Alpen (Stilpnomelan, Alkali-Amphibol, Chloritoid, Staurolith, Disthen, Sillimanit). *Eclogae geol. Helv.*, **58**, p. 335-368.
- NIGGLI, E. et ZWART, H.J. (1973). Metamorphic Map of the Alps, scale 1:1 000 000. Subcommission for the Cartography of the Metamorphic Belts of the World. Sheet 17 of the Metamorphic Map of Europe. Leiden/UNESCO, Paris.
- OBERHÄNSLI, R., BOUSQUET, R., ENGI, M., GOFFÉ, B., GOSSO, G., HANDY, M.R., HOCK, V., KOLLER, F., LARDEAUX J.M., POLINO, R., ROSSI, P.L., SCHUSTER, R., SDHWARTZ, S. et SPALLA, I. (2004). *Metamorphic Structure of the Alps* [Carte à 1/1 000 000], CCGM, Commission pour la carte géologique du Monde, Paris.
- PARKINSON, C.D. et KATAYAMA, I. (1999). Present-day ultrahigh-pressure conditions of coesite inclusions in zircon and garnet: Evidence from laser Raman microspectroscopy. *Geology*, **27**, p. 979-982.
- PICCOLI, F., LANARI, P., HERMANN, J. et PETTKE, T. (2022). Deep subduction, melting, and fast cooling of metapelites from the Cima Lunga Unit, Central Alps. *J. metamorphic Geol.*, **40**, p. 121-143.
- STRECKEISEN, A. et WENK, E. (1974). On steep isograd surfaces in the Simplon area. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **47**, p. 81-95.
- THOMPSON, P.H. (1976). Isograd patterns and pressure-temperature distributions during regional metamorphism. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **57**, p. 277-295.
- TARANTOLA, A., MULLIS, J., VENNEMANN, T., DUBESSY, J., et DE CAPITANI, C. (2007). Oxidation of methane at the CH₄/H₂O-(CO₂) transition zone in the external part of the Central Alps, Switzerland: Evidence from stable isotope investigations. *Chem. Geol.*, **237**, p. 329-357.
- TODD, C.S. et ENGI, M. (1997). Metamorphic field gradients in the Central Alps. *J. Metamorphic Geol.*, **15**, p. 513-530.
- TROMMSDORFF, V. (1966). Progressive Metamorphose kieseliger Karbonatgesteine in den

- Zentralalpen zwischen Bernina und Simplon. *Bull. suisse Minéral. Pétrogr.*, **46**, p. 431-460.
- TROMMDORFF, V. et EVANS, B.W. (1974). Alpine metamorphism of peridotitic rocks. *Bull. suisse Minéral. Pétrogr.*, **54**, p. 333-352.
- VAN DER MOLEN, I. et VAN ROERMUND, H.L.M. (1986). The pressure path of solid inclusions in minerals: the retention of coesite inclusions during uplift. *Lithos*, **19**, p. 317-324.
- VIALON, P. (1966). Etude géologique du massif cristallin Dora-Maira - Alpes cottiennes internes - Italie. *Trav. Lab. Géol. Fac. Sci. Grenoble*, Mém. n° **4**, 294 p. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00723197>
- WENK, E. (1962). Plagioklas als Indexmineral in den Zentralalpen. *Bull. suisse Minéral. Pétrogr.*, **42**, p. 139-153.