

PROGRÈS RÉCENTS EN GÉODYNAMIQUE, DEUXIÈME PARTIE : SUBDUCTION ET OBDUCTION

Dominique Rossier, animateur de la Commission de volcanisme.

1. Préambule

Cet article est la deuxième partie du précédent article intitulé « *Progrès récents en géodynamique, première partie* », paru dans *Saga Information*, n° 384 (septembre-octobre 2021). Son objet était de présenter le premier hors-série de la revue *Géochronique*, paru en décembre 2020, entièrement consacré à la géodynamique, puis de développer plus en détail l'article de Chenin *et al.* (2020) sur **les marges passives**.

Le présent article rend compte d'une partie de l'article n° 5 du hors-série et développe le sujet des marges « actives », avec les deux mots-clés **subduction et obduction**. Le titre complet de l'article de Philippe Agard et Alexis Plunder est : « *Subduction et obduction : le destin de la lithosphère océanique vu à travers ses reliques (schistes bleus, éclogites, ophiolites)* ».

C'est en quelque sorte le thème réciproque du premier (marges passives). Son importance dépasse celle de la pure connaissance, et touche les conditions de vie sur notre planète, avec les zones de subduction, zones les plus intenses en volcanisme et en séismes destructeurs.

L'article d'Agard et Plunder est complété, dans le même hors-série, par un très utile « guide d'excursion géologique » (Le Bayon, 2020).

Rappelons brièvement le contexte dans lequel nous rédigeons ces comptes rendus.

Nous avons lu pour la SAGA la totalité du hors-série de *Géochronique* afin, tout d'abord, d'en donner un aperçu d'ensemble. Puis, nous avons choisi deux chapitres et les avons approfondis afin d'être en mesure de les présenter, en développant les points difficiles. En effet, la rédaction et l'illustration des articles de ce hors-série sont très denses. Aussi, notre travail a consisté à simplifier, puis reformuler, en espérant clarifier les concepts les moins évidents. Nous avons fait le même travail sur les illustrations en les sélectionnant et en éclaircissant la présentation.

Nous abordons maintenant le thème des reliques de lithosphère océanique qui sont en lien avec les mécanismes de subduction et d'obduction, lors de la fermeture d'un océan avec formation d'une chaîne de montagne (orogénèse). Relativement à celui des marges passives, ce second thème est mieux connu de la SAGA. Nous avons acquis de l'expérience par des articles, par des voyages d'étude dans plusieurs zones reliques dans les chaînes d'orogènes anciennes et récentes qui nous sont proches et enfin par nos travaux dans le cadre du séminaire de pétrographie de la SAGA. Aussi, nous nous sommes autorisés à illustrer le compte rendu avec les observations faites dans le cadre de ces voyages d'étude et de ces séminaires de pétrographie : Groix, Massif central, Chenaillet, Monte Mucrone (NO Italie)... C'est ce dernier cas qui sera plus particulièrement illustré.

Après une brève introduction, l'article d'Agard et Plunder est organisé en deux premières parties, correspondant à des apports des recherches récentes. Les mots-clés sont en caractères gras.

La première, la plus courte, concerne la mise en évidence de l'**obduction** d'un petit massif volcanique de la suture de Zagros (Iran), et les enseignements remarquables que l'on peut en tirer sur les risques sismiques. Nous développons cette première partie.

La deuxième partie est centrale et nous la développons largement ; elle est consacrée à un sujet que nous connaissons à la SAGA : les reliques de croûte avec **subduction**, puis **obduction**, donc avec **métamorphisme de haute pression**. Nous reformulons les nouveaux concepts exposés, et illustrons par les exemples des Alpes franco-italiennes du hors-série, complétés par nos propres exemples.

Enfin, l'article d'Agard et Plunder comporte une troisième partie qui concerne les grands fragments régionaux de lithosphère océanique épargnés par la subduction et « sauvés des eaux » par obduction. L'exemple le plus étudié au monde est celui de l'**ophiolite** de

2. Introduction

Semail (Oman). La dimension géographique et la complexité des phénomènes de création et de mise en place nécessiteront un troisième article, avec un développement spécialement consacré à ces ophiolites, dites « vraies ».

Le Semail (Oman) est le site le plus étudié par la communauté internationale des géologues, véritable modèle des grands massifs d'ophiolite observés ailleurs dans le monde (Nouvelle-Calédonie, Terre-Neuve, Turquie, Chypre, Timor et Papouasie-Nouvelle Guinée). Il conduit à exposer le phénomène complexe de **supra subduction** en deux épisodes : l'un de **subduction intraocéanique**, le second de mise en place par **obduction**, les deux pouvant être séparés par un intervalle de temps qui peut être long à l'échelle des temps géologiques.

Les fonds océaniques sont jeunes au regard des temps géologiques, plus jeunes que 200 Ma (millions d'années). En effet, le destin de la lithosphère océanique est inéluctablement de disparaître, lors de la fermeture des océans par la tectonique des plaques, et d'être engloutie par subduction sous certaines marges des continents, dites marges actives. La fermeture s'effectue alors à la suture entre deux plaques continentales et est généralement suivie par une orogénèse. Malgré ces bouleversements tectoniques, il est possible de retrouver dans ces orogènes de très nombreux vestiges de la lithosphère disparue, comme l'illustre la carte de la figure 1, adaptée à partir de celle publiée dans l'article d'Agard et Plunder (2020).

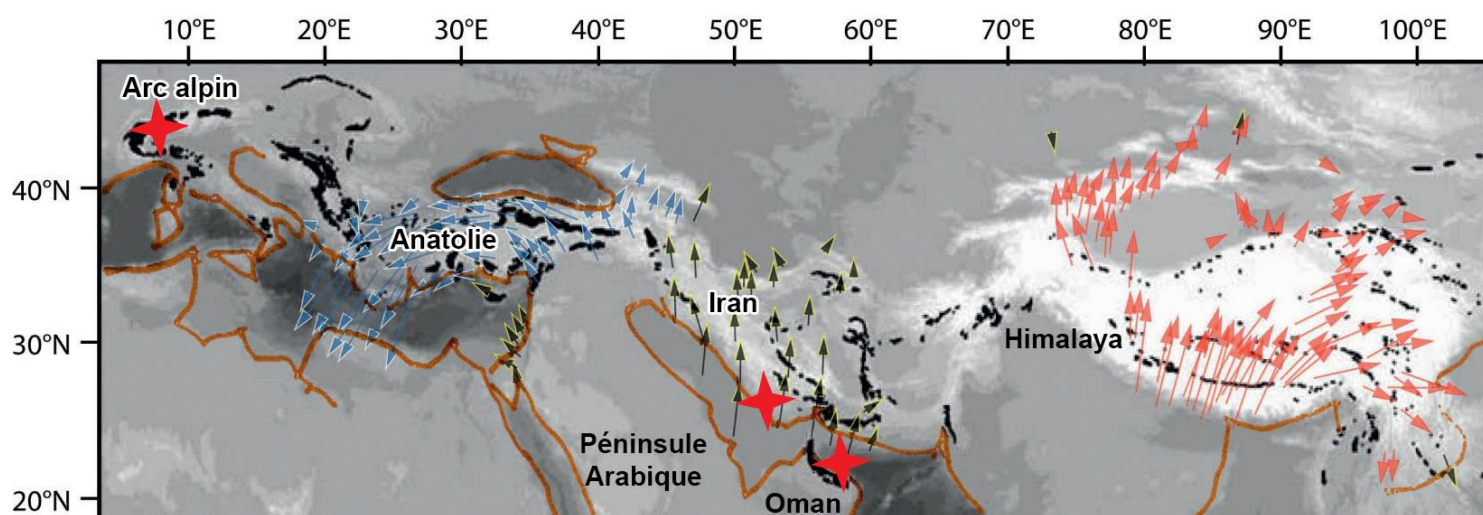


Figure 1. Les contours de la Méditerranée (à gauche), du golfe Persique (au milieu) et de l'océan Indien (à droite), ont été esquissés pour permettre de situer les très nombreux fragments ophiolitiques.

Ils sont représentés par les chapelets de points noirs disséminés dans les grands orogènes allant des Alpes à l'Himalaya, centrés sur les sutures des grands océans téthysiens disparus.

Les flèches indiquent les déplacements actuels des différents domaines.

Les trois sites retenus dans l'article et signalés par une étoile rouge, sont : à gauche, les Alpes franco-italiennes (le présent article) ; au milieu, la suture du Zagros (Rossier, 2021) ; à droite, l'ophiolite d'Oman (article à venir).

D'après Agard et Plunder (2020), fig. 1.

3. Un mont sous-marin partiellement subducté, à faible profondeur, puis exhumé : Siah Kuh (Zagros, Iran)

Un des enjeux des études du phénomène de subduction touche à la sécurité et à l'existence de nos sociétés. En effet, la subduction est responsable des principaux séismes sur la Terre, de tsunamis et aussi d'éruptions volcaniques dévastatrices. Les séismes se produisant tout le long de l'interface de subduction, « il est essentiel de connaître le comportement mécanique et la segmentation, notamment longitudinale, de la zone de subduction » (Agard et Plunder, 2020). Les séismes prennent naissance dans la zone sismogénique

du panneau plongeant, dit « slab », généralement entre 20 et 35 km de profondeur. Mais sur quelle étendue longitudinale du plan de glissement ?

La question est cruciale pour prédire la **magnitude** ⁽¹⁾ d'un séisme : celle-ci peut atteindre des valeurs de 8 pour une étendue de 100 km, comme cela s'est déjà produit sur les côtes chiliennes, une des zones de la planète où l'énergie sismique dissipée est la plus importante. Clairement, une segmentation du plan de glissement va être un facteur déterminant, par exemple par l'existence d'un obstacle comme un mont sous-marin entraîné dans la subduction.

C'est ce cas qui a été récemment testé sur la marge eurasiennne de l'Iran, zone de collision entre plaques

Arabie et Eurasie. Il s'agit du mont Siah Kuh (montagne noire) dans le massif du Zagros (figure 2). Ses dimensions sont comparables à celles des monts observés sur le plancher océanique au large du Chili.

La figure 2 montre que le mont Siah Kuh est en deux parties : l'une très majoritaire, notée **A**, est principalement basaltique. La petite portion **B** (dans le quart supérieur droit) est remarquable, car elle fait apparaître des écaïlles superposées de basalte, de gabbros et de péridotite. Ces écaïlles recèlent des minéraux marqueurs d'un métamorphisme de haute pression, typi-

que d'un enfouissement par subduction. Ces écaïlles de nature ophiolitique sont la marque d'une croûte océanique subductée, puis obductée ; elles ont été décollées et sont venues chevaucher la portion majoritaire **A**, comme le montre la coupe de la figure 3.

La présence des minéraux marqueurs du métamorphisme de haute pression ⁽²⁾, comme la lawsonite et le glaucophane (étoiles sur la figure 2), est précieuse, car elle permet d'étalonner l'échelle des profondeurs de subduction des écaïlles : dans le cas présent, elle est de 25 à 30 km.

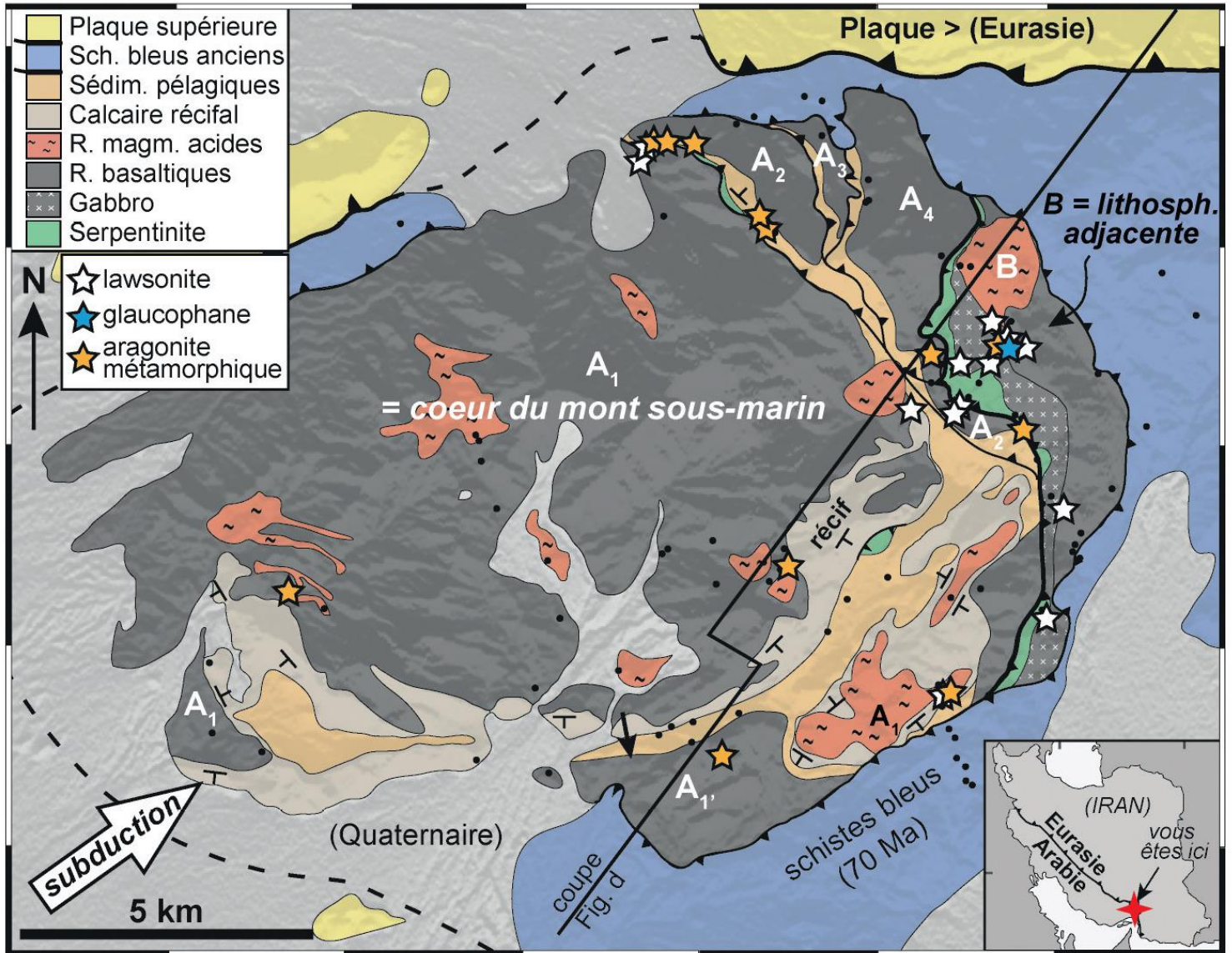


Figure 2. Le mont Siah Kuh, ancien mont sous-marin, se dresse dans les plaines quaternaires de la bordure iranienne du golfe Persique. La localisation (étoile rouge, figure 1) du mont Siah Kuh au voisinage de la suture entre deux plaques : la plaque Arabie (au sud), remontant et en collision avec la plaque iranienne au nord. D'après Agard et Plunder (2020), fig. 3.

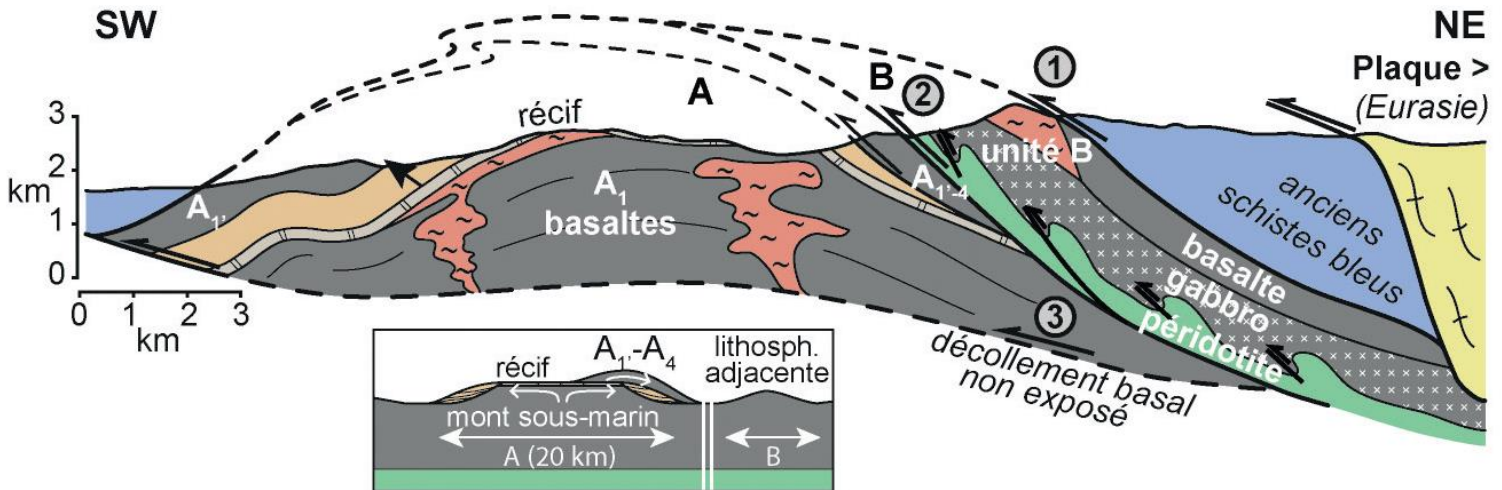


Figure 3. La coupe du mont Siah Kuh permet de visualiser :
 1) le décollement, suivi du chevauchement sur le massif basaltique, de la petite unité B, sur la grande unité A ;
 2) la structure ophiolitique des écailles ;
 3) les écailles sont surmontées d'une épaisse couche de schistes bleus, issus du métamorphisme haute pression des sédiments marins subductés.
 Détail de la figure 3 d'Agard et Plunder (2020).

Comme ces deux minéraux auront de l'importance dans la suite de l'article, il est utile de rappeler ici les principes à la base de l'étalonnage des échelles pression-température en métamorphisme de subduction.

Pour une roche en cours d'enfouissement, les paramètres pression et température s'accroissent simultanément en suivant une loi représentée par la courbe dite géotherme dans le diagramme pression/température, ou profondeur/température. Le géotherme est d'autant plus redressé que la vitesse d'enfouissement est rapide, comme lors des subductions. Le géotherme de subduction pour le *slab* du Zagros est représenté à environ 10 °C/km sur le graphique de la figure 4. Le géotherme limite est de 6 °C/km : aucun enfouissement ne peut se faire pour une valeur inférieure, c'est-à-dire pour une vitesse d'enfouissement supérieure à celle de cette limite.

Les minéraux marqueurs apparaissent successivement, puis disparaissent et sont remplacés par d'autres minéraux, au fur et à mesure de la montée en pression due à l'enfouissement. La température augmente aussi, mais beaucoup moins rapidement. Dans le cas général des subductions, la **lawsonite** apparaît en premier, suivie du **glaucophane**, dont le domaine de stabilité s'étend jusqu'à des pressions très élevées. C'est le domaine des **schistes bleus**. Néanmoins, si la température dépasse 500 °C, la roche pénètre dans le domaine des **éclogites** et l'association jadéite + quartz apparaît.

Le domaine du mont Siah Kuh est représenté par le petit rectangle au début du géotherme. Il s'inscrit dans la zone des schistes bleus où lawsonite et glaucophane peuvent cohabiter, pour une pression de 10 kbars et une température qui reste modeste, inférieure ou égale à 300 °C.

Le petit Mont Siah Kuh a été subducté jusqu'à 30 km de profondeur, mais pas plus car, immédiatement après, il a été soutiré et encastré dans la marge eurasienne, puis exhumé. Or, cette profondeur d'enfouissement correspond juste à la zone critique de sismicité, dite *zone sismogénique* du *slab*, zone à laquelle se produisent les plus fortes ruptures sismiques en subduction. Sa connaissance va nous permettre maintenant de conclure. En effet, il existe des méthodes de détection des traces laissées dans les roches par les séismes. Dans le *slab sismogénique*, les roches peuvent être localement et brièvement fondues par la chaleur frictionnelle dégagée par un séisme : ce sont les *pseudotachylites*. Or, dans les écailles du mont Siah Kuh, pas de traces significatives de ces témoins ; le mont aurait servi de barrière d'évitement pour l'extension des séismes.

« Si grands séismes il y eut, ils ont donc soigneusement évité le Siah Kuh »
 (Agard et Plunder, 2020).

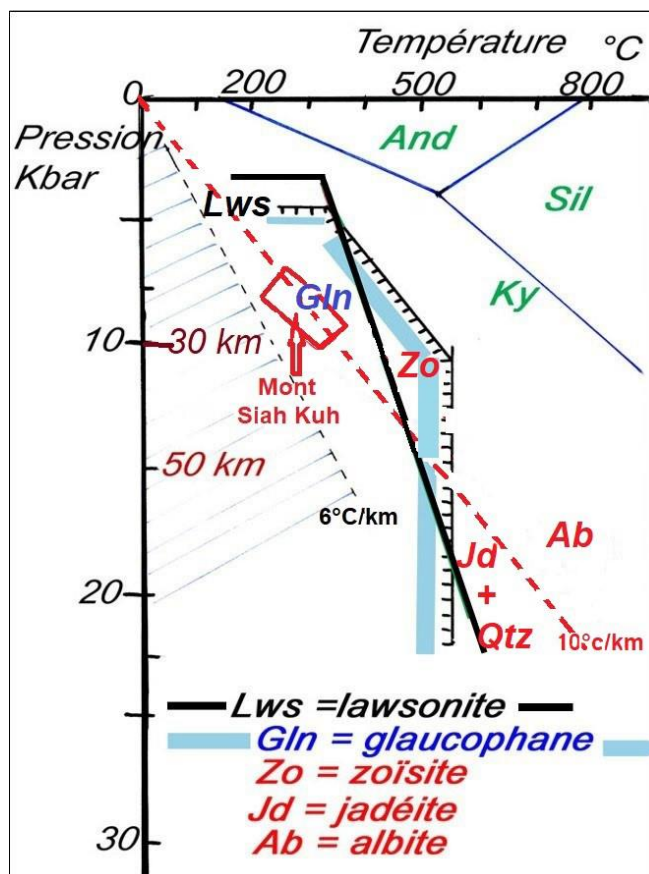


Figure 4. Diagramme pression/température, ou profondeur d'enfouissement /température. La température est en abscisse et la pression, comme la profondeur, est en ordonnées, orientées vers le bas : on voit par exemple qu'une pression de 10 kbar correspond à une profondeur de 30 km.

Dans la légende désignant les noms des minéraux marqués, la lawsonite (**Lws**) apparaît en premier lors de la montée en pression, suivie par le glaucophane (**Gln**), minéral de couleur naturelle bleu intense, qui donne son nom au faciès « schistes bleus ». À ces minéraux sont associées des limites d'existence au-delà desquelles ils disparaissent au profit des autres minéraux marqués, comme la jadéite à plus haute pression.

L'apparition de la jadéite (**Jd**), à laquelle s'ajoute du quartz, accompagne le passage dans le faciès des **éclogites** : la température dépasse 500 °C et la pression 15 kbar. Dans le quart supérieur droit, diagramme d'équilibre des trois polymorphes du silicate d'alumine, marqueurs essentiels du métamorphisme : **And** = andalousite, **Ky** = kyanite, **Sil** = sillimanite. Les minéraux des éclogites sont anhydres, alors que la composition du glaucophane et de la lawsonite comprend des radicaux hydroxyle. Schéma D. Rossier.

4. Les reliques de croûte océanique et/ou continentale après subduction, puis exhumation, métamorphisme de hautes pressions. Les éclogites

Agard et Plunder concentrent leur présentation sur les Alpes franco-italiennes, avec le cas emblématique du mont Viso, qui concerne une relique de croûte océanique subductée, écaillée, puis exhumée. Nous allons le présenter dans le paragraphe 4.1.

Puis, au paragraphe 4.2, un complément sera apporté par les observations pétrographiques faites à la SAGA sur des échantillons rapportés par Jean Combettes du Monte Mucrone, dans le Valle Sesia, au nord de Turin. Cette fois, il s'agira d'un fragment de croûte conti-

mentale subductée avec la croûte océanique, à la fin de la fermeture de l'océan Téthys. Le Monte Mucrone est un précieux laboratoire d'étude des minéraux du métamorphisme de hautes pressions !

Toutefois les Alpes ne sont pas la seule région où ces reliques peuvent être observées. Il y a d'autres occurrences importantes en France, souvent bien plus anciennes, de reliques typiquement éclogitiques. Nous en avons étudié deux à la SAGA et nous nous limitons à les mentionner avec les références sur le site de notre société :

- l'île de Groix, avec la fermeture du bras océanique entre Avalonia et Armorica, et collision entre cette dernière et le Gondwana, à la limite entre le Silurien et le Dévonien (Prié, 2022) ;

- le vaste essaim éclogitique du synclinal d'Uzerche (Limousin), formé au Cambrien, puis rétro-morphosé dans le cadre du métamorphisme régional, au Dévonien (Mahéroult, 2022 et site Internet SAGA).

4.1. Reliques dans les Alpes franco-italiennes : les éclogites du mont Viso

On trouve au cœur de la chaîne, toujours en altitude, de nombreux vestiges de croûte océanique sous la forme de laves en coussins, de gabbros issus de chambres magmatiques et enfin de roches mantelliques (figure 5).

Le site patrimonial du Chenaillet en est une illustration remarquable (Levert, 2015), mais il n'est pas traité dans le cadre présent, puisqu'on doit le considérer comme un copeau ayant échappé à la subduction, avant d'être encastré dans le prisme d'accrétion : il ne relève pas de fragments ophiolitiques haute pression.

Aussi Agard et Plunder s'intéressent ici aux nombreux cas où les reliques, préalablement à leur sou-tirage, ont été profondément subductées, jusqu'à des profondeurs parfois largement supérieures à 50 km. Dans de telles conditions, les rééquilibrages thermodynamiques conduisent à de nouveaux minéraux, marqueurs du métamorphisme de haute pression et de très haute pression, dont nous avons vu des premiers exemples au paragraphe 3 (mont Siah Kuh), sous la forme de schistes bleus. Aux pressions supérieures à 15 kbar, soit 1,5 gigapascal, et des températures supérieures à 500 °C, les roches subissent une nouvelle transformation qui les fait entrer dans le vaste domaine des éclogites (voir figure 4).

Les auteurs du hors-série ont choisi le site du versant oriental du mont Viso pour illustrer le cas des éclogites présentes dans un fragment ophiolitique (coupe figure 6 et cliché de la figure 8).

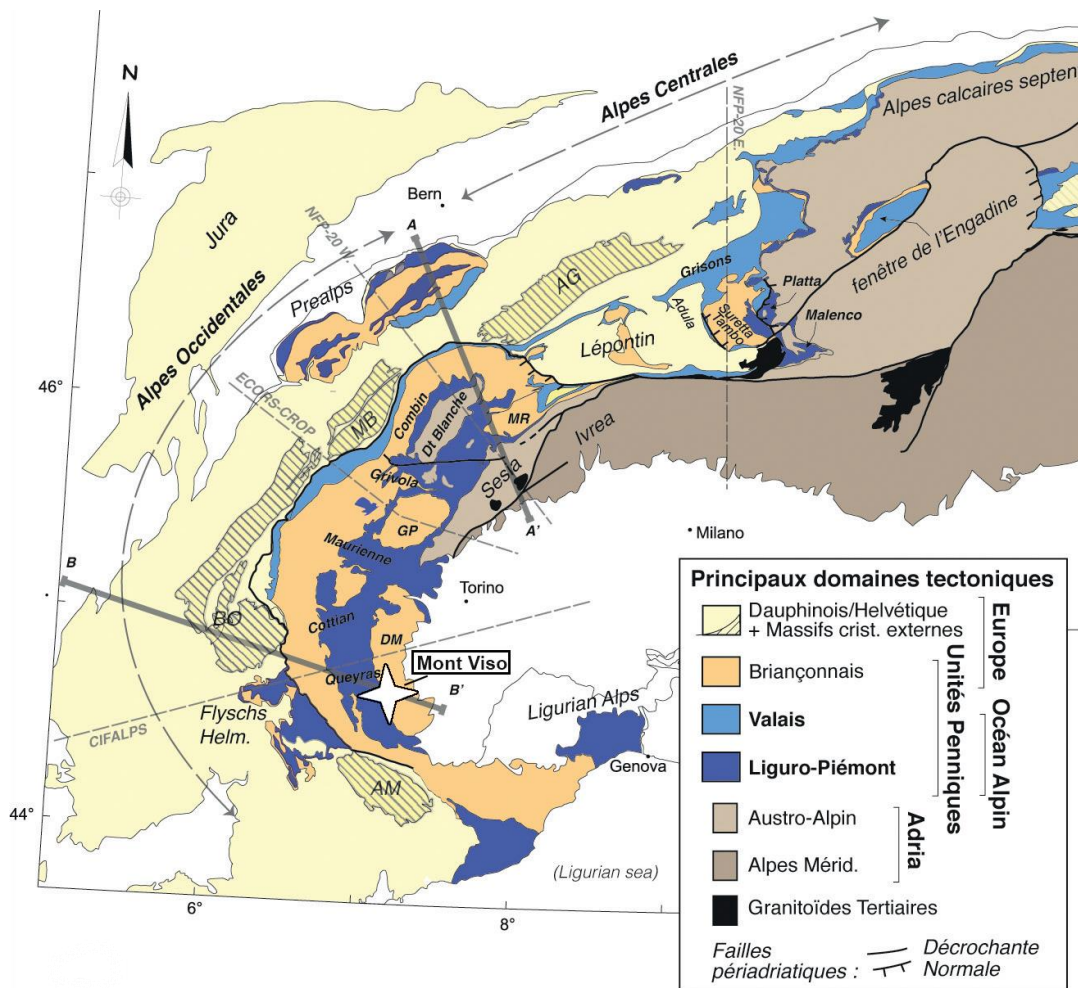


Figure 5. Schéma structural des Alpes, figurant les principaux domaines paléogéographiques liés à l'ancien océan alpin. Les vestiges les plus profonds remontés avec faciès éclogitique sont tous du domaine liguro-piémontais (en bleu foncé sur la carte) qui correspondait à l'océan alpin avant sa fermeture. La petite croix blanche indique la position géographique du mont Viso dans le domaine liguro-piémontais. DM = Dora Maria ; GP = massif cristallin du Grand Paradis. Extrait de la figure 4 d'Agard et Plunder (2020).

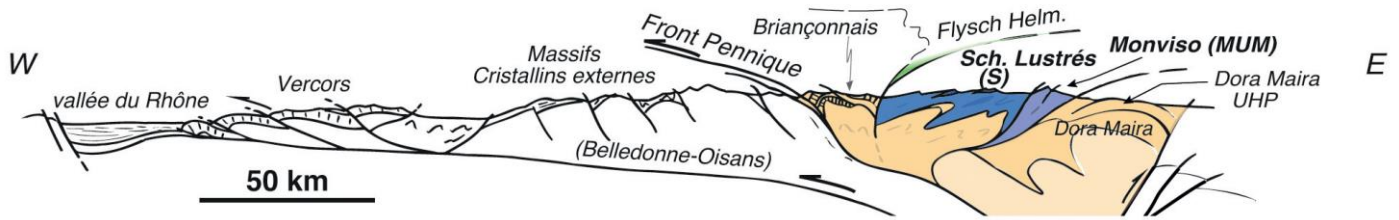


Figure 6. Coupe crustale schématisée passant par le Briançonnais (Chenaillet) et la petite écaille de roches mafiques et ultramafiques métamorphisées à haute pression (MUM) du mont Viso.

La Doria Maria a subi des pressions encore plus élevées.

S = schistes lustrés. MUM = mafiques – ultramafiques. UHP = ultra haute pression.

D'après Agard et Plunder (2020), fig. 5a.

La coordinatrice de ce hors-série de *Géochronique* a eu l'idée de joindre un complément (pages 82 et suivantes), dit « *Réalité terrain* », véritable guide d'excursion. Il est intitulé : « *Une excursion géologique dans les Alpes occidentales au plus près des principaux processus géologiques* » (Le Bayon, 2020).

Le terme **éclogite** provient du grec *εκλογή* = action de choisir, sélection. R.-J. Haüy en donne la définition suivante :

« *Roche dont la minéralogie est inhabituelle, composée d'un pyroxène et d'un grenat, toujours dépourvue de plagioclase. [...] avec parfois quelques minéraux subordonnés, dont le quartz, assez abondant, la cyanite, le rutile, le glaucophane, la zoïsite, la muscovite... et même le diamant !* ».

Le pyroxène est particulier, puisqu'il est formé à très hautes pressions dans un état métastable ; il s'agit de l'**omphacite**, solution solide de jadéite, de diopside et de hédénbergite, c'est-à-dire des trois pôles des clinopyroxènes : le pôle sodique pour la jadéite, celui calcique pour le diopside et celui ferreux pour l'hédénbergite.

Si l'exhumation est suffisamment rapide, l'état métastable est conservé, l'éclogite est « fraîche » (figures 7a et 7b). Nous avons eu la chance de l'observer au cours de nos recherches dans la région métamorphique du Bas Limousin. C'est un cas plutôt exceptionnel car, la plupart du temps, le retour vers les conditions de pression et de température à la surface se fait avec destruction partielle ou totale (amphibolitisation) de l'omphacite et des grenats pyropes⁽³⁾.

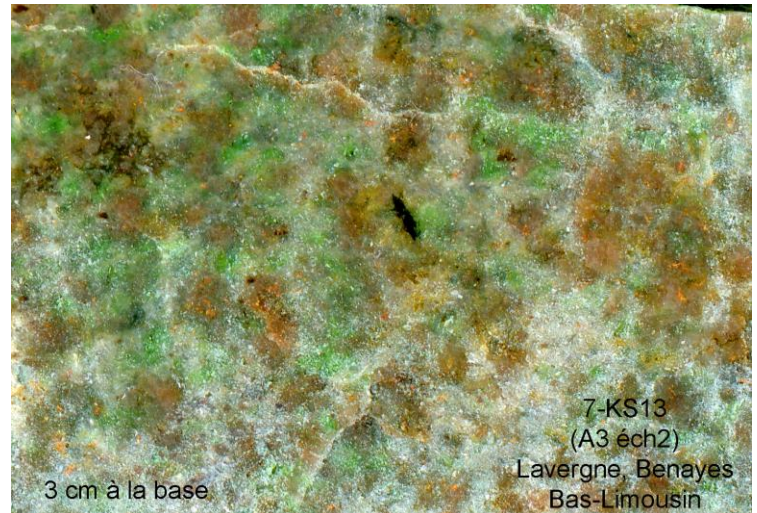
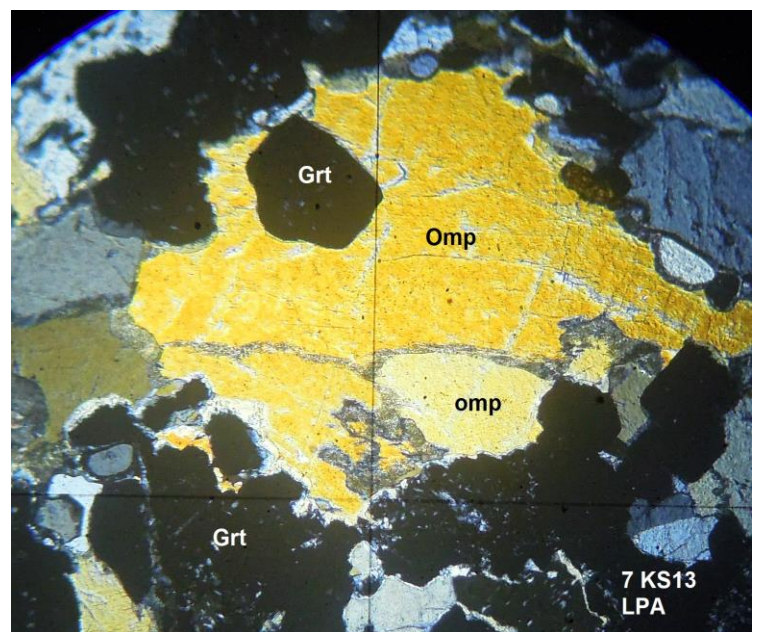


Figure 7a. Éclogite « fraîche » de La Vergne (commune de Benayes, Corrèze). Coupe polie.

Les grenats rouge/brun se détachent sur le fond vert émeraude de l'omphacite.

Cliché D. Rossier.



► Figure 7b. Éclogite fraîche de La Vergne (commune de Benayes), en lame mince observée en lumière analysée.

Omp = omphacite. Grt = grenat pyrope.

Échelle 2 mm à la base. Cliché D. Rossier.

Revenons à l'article d'Agard et Plunder et au mont Viso. L'article et le supplément consacré à l'excursion (Le Bayon, 2020) expliquent les transformations subies par les vestiges océaniques du domaine liguro-piémontais enfouis par la subduction. Ces transformations résultent de rééquilibrages thermodynamiques à des pressions qui peuvent dépasser 2,5 Gpa (gigapascals) correspondant à l'enfouissement jusqu'à 80 km de profondeur pour les éclogites.

Le cas du mont Viso est exceptionnel, car il montre « l'un des plus beaux fragments de slab connus au monde », l'écaïlle éclogitique du Lago Superiore, illustré par la vue de la figure 8. Il s'agit d'un fragment presque intact de lithosphère océanique (océan Téthys) subductée, formant une série dans laquelle on peut identifier les protolithes de la séquence ophiolitique classique :

manteau/gabbro/basalte/sédiment.

L'unité du Lago Superiore est constituée de centaines de mètres de croûte basaltique éclogitisée, recouvrant un corps gabbroïque également éclogitisé et d'épaisseur comparable, au-dessus d'épaisses serpentinites. Bien que tectonisée et métamorphisée dans le domaine des éclogites, donc à 80 km de profondeur, la séquence est globalement préservée, d'où les dénominations de la figure 8, métagabbros et metabasaltes. La tectonisation a consisté en grandes zones de déformation intense, induites dans le chenal de subduction. Ces zones et les mécanismes de cisaillement associés sont expliqués et illustrés par des schémas dans l'article.

La figure 9 est une illustration spectaculaire des superpositions entre unités éclogitisées écaillées et tectonisées. Lors du plongement de la plaque, certaines

unités de cette dernière se bloquent et se désolidarisent du *slab*. Elles sont alors incluses dans une sorte de chenal en haut de la plaque : le chenal de subduction, qui va à contre-courant du *slab*. Ce chenal récolte certaines écaïlles ainsi désolidarisées, les préserve de la disparition et les met en réserve pour la phase d'exhumation. Le schéma de la figure 10 représente un modèle simplifié du chenal de subduction conduisant la remontée des unités écaillées et désolidarisées de la plaque lithosphérique plongeante.

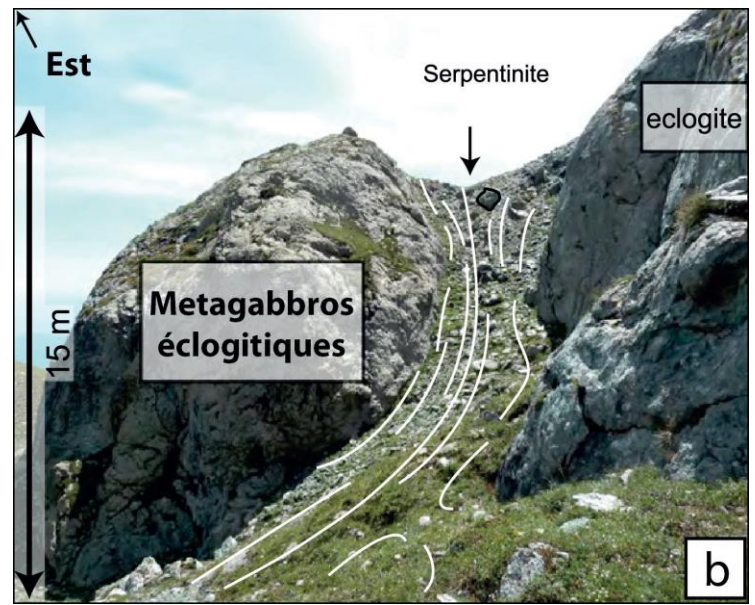


Figure 9. Contact entre éclogites (qui sont des metabasaltes) et les métagabbros éclogitisés. Le contact est marqué par des serpentinites. D'après Le Bayon (2020), fig. 16b.



Figure 8. Panorama de Pian del Re (2020 m). Complexe méta-ophiolitique du mont Viso. Sur cette vue ont été indiquées par des codes de couleur les différentes unités de la séquence ophiolitique éclogitisée. Les trois zones de cisaillement sont indiquées par les majuscules en italiques, *USZ* pour unité supérieure, *ISZ* pour l'intermédiaire et *LSZ* pour l'unité inférieure. D'après Angiboust et al., 2011 in Le Bayon (2020), fig. 16a.

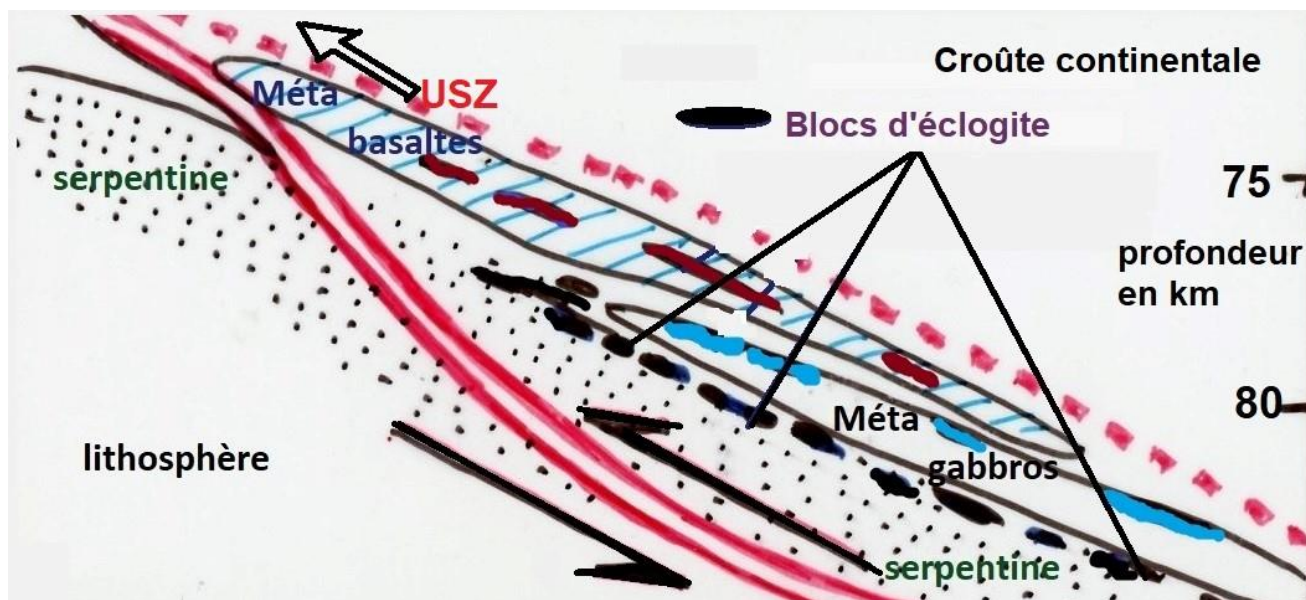


Figure 10. Dans ce modèle schématique du chenal, le sommet de la plaque plongeante est serpentinisé. Il fonctionne comme un lubrifiant, ce qui permet le découplage du slab des unités métagabbros et metabasites, leur écaillage et leur remontée. Simultanément, des blocs d'éclogites écaillés des profondeurs supérieures à 80 km sont transportés le long des grandes zones de cisaillement « à la manière d'un roulement à billes » (Le Bayon, 2020, p. 92). La zone supérieure de cisaillement USZ est marquée sur la figure. Dessin D. Rossier, d'après la figure 17 de Le Bayon (2020).

4.2. Reliques dans les Alpes franco-italiennes : les éclogites du Monte Mucrone, laboratoire d'étude des minéraux du métamorphisme de hautes pressions !

Un complément peut être fourni par nos observations pétrographiques sur des échantillons rapportés à la SAGA par Jean Combettes, lors d'un voyage au Monte Mucrone, dans le Valle Sesia, au nord de Turin (voir la carte géologique schématique, figure 11). Le gisement d'éclogites est exceptionnel par sa facilité d'accès. À partir du sanctuaire d'Oropa, accessible à partir de la ville de Biella, prendre le téléphérique jusqu'à la gare supérieure et emprunter le sentier du Lago Mucrone sur les flancs du sommet. Après quelques centaines de mètres de marche, les affleurements surgissent avec des faciès à gros grenats et d'autres à plus petits grains.

Les roches de l'affleurement sont saines. Il est considéré comme un lieu idéal d'étude de ces métamorphites, ainsi que des transformations rétrogrades qu'elles subissent lors de l'exhumation : c'est la rétro-morphose. En effet, celle-ci peut faire cohabiter schistes verts et schistes bleus avec les éclogites, dans un même affleurement, ce qui facilite l'observation de tous les minéraux marqueurs de ce type de métamorphisme de hautes pressions.

Une autre raison accroît encore l'intérêt de Monte Mucrone : le protolithe n'est pas un morceau de croûte océanique, mais un fragment de prisme d'accrétion ; c'est un morceau de croûte continentale, subducté avec la croûte océanique.

Dans la localité indiquée ci-dessus, deux types d'affleurements sont à observer. Nous ne décrivons que le premier, celui dit à gros grains. Le second est tectonisé et folié, mais sa composition minéralogique est proche.

Sur le premier, la roche massive apparaît d'un beau vert-bleuté, sur lequel se détachent des grenats roses à rouges, pouvant atteindre le centimètre (figure 12). La structure est homogène à grande échelle, la roche n'étant pas affectée par une foliation. Cependant, les grenats sont répartis inégalement et certaines zones apparaissent presque entièrement pavées de grenats en contact (figure 13). Globalement, ceux-ci sont majoritaires, par rapport à l'autre minéral important, l'omphacite. C'est le tableau classique d'une éclogite. On le complète par la présence de petits grains de rutile dispersés dans toute la roche, et de lattes discrètes de cyanite, qui est la phase haute pression du silicate d'alumine, marqueur important du métamorphisme (figure 14). Sa présence, même limitée, montre également que la température a pu dépasser 500 °C, à la fin du séjour en hautes pressions (au moins 20 kbar) (voir graphique de la figure 4).

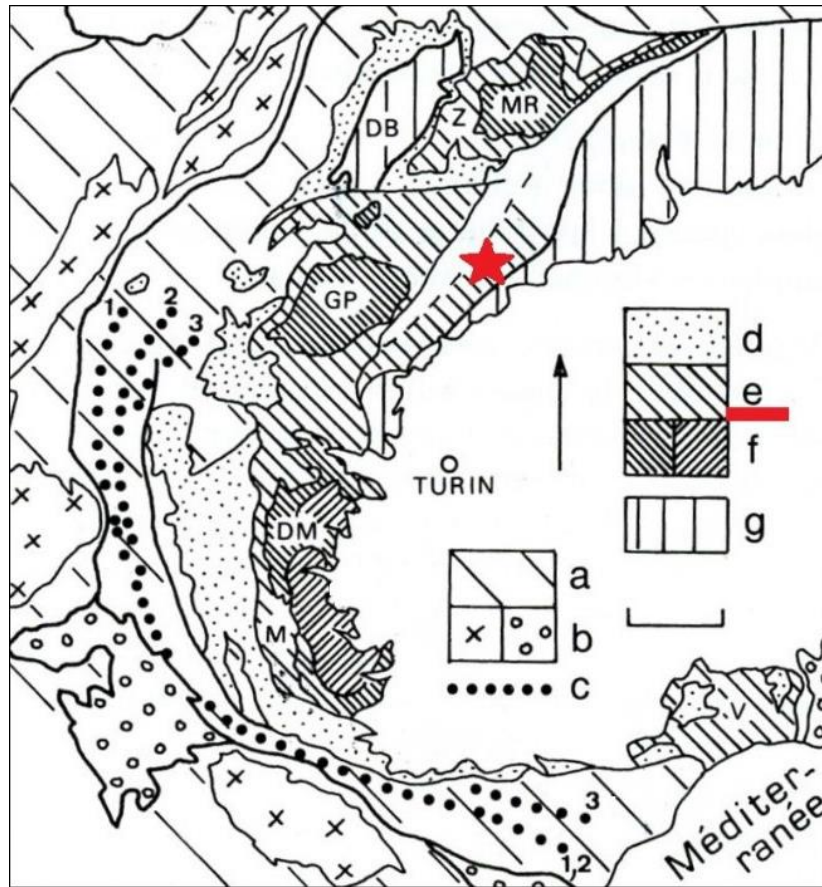


Figure 11. Répartition des faciès métamorphiques dans les Alpes occidentales.

L'étoile rouge indique la localisation de Monte Mucrone dans l'unité de Sesia-Lanzo, qui est une unité de métapélites éclogitisées (hachures obliques), à l'est du massif du Grand Paradis (noté GP).

a = unités alpines européennes, helvétiques, penniques et Briançonnaises. **b** = massifs cristallins externes (croix) et nappes ultrabriançonnaises (cercles). **c1** et **c2** = apparition de la lawsonite et de la carpholite dans les métapélites du Briançonnais. **c3** = disparition de la carpholite dans ces unités. **d** = unités ophiolitiques recrystallisées dans le faciès schistes verts et le faciès schistes à glaucophane. **e** = unités ophiolitiques et métapélites recrystallisées dans le faciès des éclogites (**Z** : unité de Zermatt-Saas Fee ; **S** : Sesia-Lanzo ; **M** : mont viso ; **V** : groupe de Voltri). **f** : massifs cristallins internes recrystallisés dans le faciès à éclogites (**MR** : mont Rose ; **GP** : Grand Paradis ; **DM** : Doria Maria). Hachurés NE-SO : extension du domaine à coésite. **g** : unités austro-alpines (**DB** : nappe de la Dent blanche).
Échelle : 25 km. In Kornprobst (2007).



Figure 12. Bloc d'éclogite dite à gros grains, de Monte Mucrone. Photo J. Combettes.

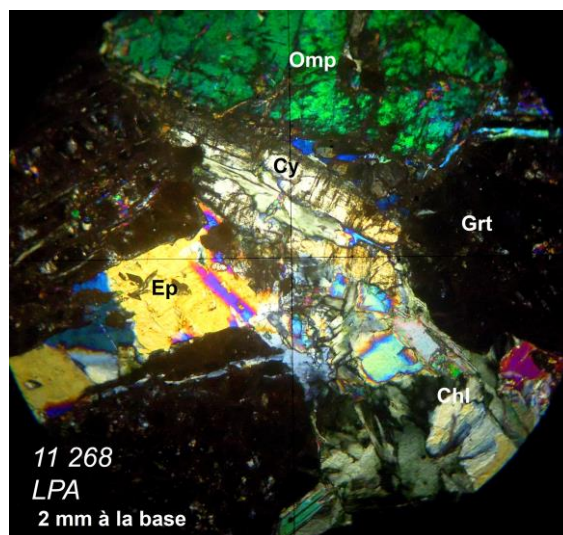
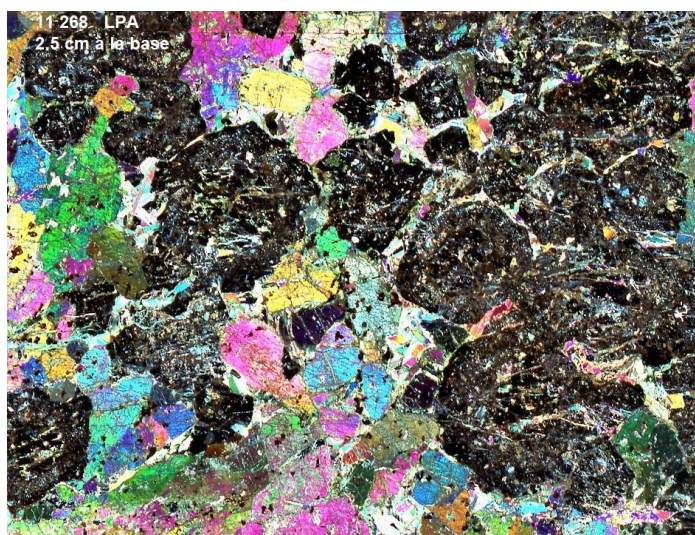


Figure 13, à gauche. Lame mince dans une éclogite à gros grains de Monte Mucrone. Cliché en lumière polarisée analysée. Les grains subcentimétriques à centimétriques de grenat apparaissent noirs, en fort contraste sur les grains deux fois plus petits d'omphacite, aux teintes très vives. Les grains de rutile, de taille de l'ordre de 0,1 mm, apparaissent en inclusion dans les cristaux d'omphacite (bleu et vert pâle), au centre de la moitié inférieure. Le rutile est l'oxyde de titane. Il est rouge sombre, presque opaque, car sa réfringence et sa biréfringence sont énormes. Cliché D. Rossier.

Figure 14, à droite. Lame mince dans une éclogite à gros grains de Monte Mucrone. Cliché en lumière polarisée analysée. Petite latte de cyanite (Cy), entre les gros grains de grenat (Grt) et d'omphacite, cette dernière avec des teintes de Newton vives (Omp). L'épidote (Ep) et la chlorite, en bas du cliché (Chl), résultent de l'altération par des fluides, lors du processus de retour aux conditions de pression et de température de la surface. On rappelle qu'une éclogite est complètement déshydratée à l'issue du processus de formation prograde, c'est-à-dire de la montée en pression et température, lors de la subduction. Cliché D. Rossier.

Mais ce n'est pas tout ; observons de près les intervalles et les canaux clairs ouverts entre les grenats, sur le cliché de la figure 13.

Ils sont occupés par plusieurs nouveaux minéraux. Ce sont des minéraux marqueurs d'un métamorphisme de pression moins élevée, dans le faciès des schistes bleus. Ils peuvent être des reliques conservées du passage dans ce faciès au cours de la subduction, quand la roche n'est pas encore complètement déshydratée.

Mais ils peuvent aussi être les témoins des transformations rétrogrades, très partielles, qu'aurait subies l'éclogite lors de son exhumation, en présence de fluides. Ils sont composés de trois minéraux (figures 15 a, 15b et 15c) qui tous sont hydroxylés, c'est-à-dire avec des molécules (OH) dans leur composition :

- la **phengite**, qui est une variété de mica magnésien, proche de la muscovite ;
- le **glaucophane** (amphibole magnésienne et sodique), et la **lawsonite** (calcique), qui sont tous deux de bons marqueurs du métamorphisme de hautes pressions du faciès schistes bleus. Ils sont caractéristiques de pressions moins élevées que celles du faciès des éclogites (graphique de la figure 4).

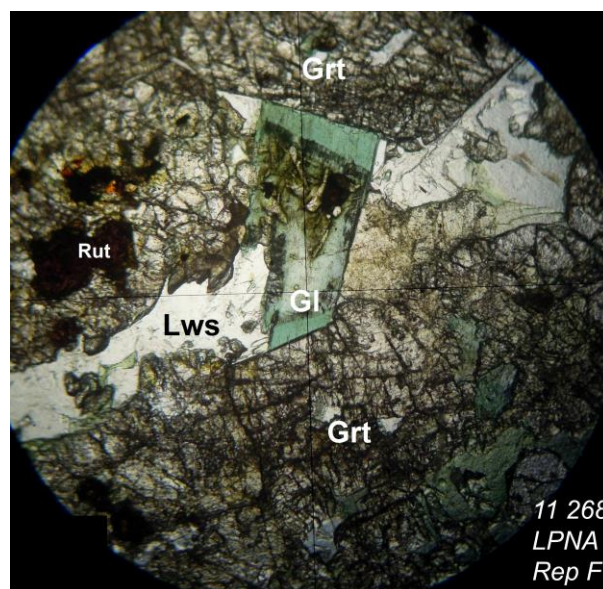


Figure 15a. Lame mince dans une éclogite à gros grains de Monte Mucrone. Cliché en lumière polarisée naturelle. Échelle 2,5 mm à la base. Cliché D. Rossier. Le canal entre les deux grenats est comblé par de la lawsonite (Lws), et traversé par un cristal automorphe de glaucophane (Gl). Ce dernier est reconnaissable à sa teinte naturelle vert/bleu qui varie en intensité avec l'orientation du cristal par rapport au polariseur du microscope (pléochroïsme).

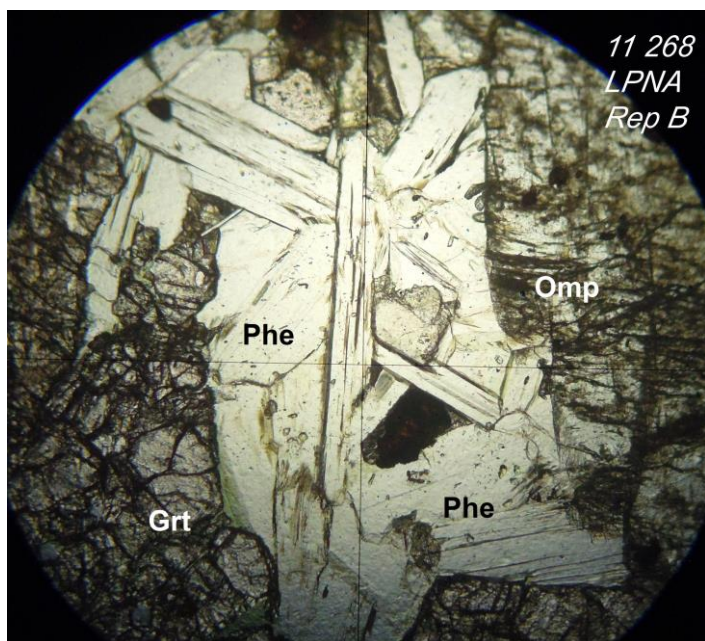


Figure 15b. Lame mince dans une éclogite à gros grains de Monte Mucrone. Cliché en lumière polarisée naturelle. Échelle 2,5 mm à la base. Cliché D. Rossier. Lattes de phengite (**Phe**) entrecroisées, en remplissage entre un grenat (**Grt**) et une omphacite (**Omp**).

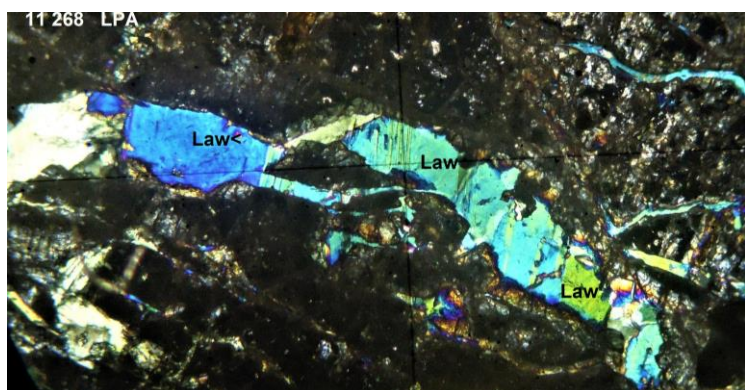


Figure 15c. Lame mince dans une éclogite à gros grains de Monte Mucrone. Cliché en lumière polarisée analysée. Échelle 2 mm à la base. Cliché D. Rossier. Filet entre deux grenats, à remplissage de lawsonite. Ce minéral s'identifie à sa biréfringence, et surtout à des figures de macles, bien caractéristiques : macles « polysynthétiques », analogues à celles de l'albite.

Conclusion

Les reliques de fragments de croûte océanique que l'on trouve dans tous les orogènes offrent la matière essentielle pour l'étude du métamorphisme de hautes pressions. Certaines reliques permettent d'observer les transformations sur une gamme relativement étendue de pressions, incluant parfois des pressions extrêmes. L'étude de ces vestiges nécessite de prendre en compte les deux temps de leur histoire tectonique et métamorphique : le temps de la subduction, où l'eau contenue

dans la plaque plongeante joue un rôle important, suivi du temps de l'obduction qui peut s'accompagner de transformations rétrogrades si l'exhumation n'est pas trop rapide.

Les Alpes sont un terrain idéal pour les observations de terrain mettant en lumière les phénomènes tectoniques de subduction et d'obduction et en offrant, en altitude, les meilleures conditions d'échantillonnage pour la pétrographie. Pour autant, il ne faut pas négliger les reliques existant dans les massifs de la chaîne varisque, dont la fraîcheur est presque toujours moindre et qui sont souvent plus difficiles à interpréter.

Notes

(1) La magnitude est la mesure de la taille d'un séisme et de l'énergie libérée.

(2) Pour toutes les notions de métamorphisme régional, et particulièrement de métamorphisme hautes pressions, le lecteur pourra se rapporter à la partie « Roches métamorphiques » dans la rubrique « pétrographie » du site Internet de la SAGA, avec son introduction sous le titre des « Entretiens sur le métamorphisme ». Les éclogites sont traitées également dans cette partie, dans la rubrique du métamorphisme du Bas Limousin.

(3) Voir *Guide 6M. Éclogites et métaéclogites*, dans l'*Atlas pétrographique* de la SAGA, notice des roches métamorphiques.

Remerciements

L'auteur est reconnaissant à Jean Combettes et Arnaud Prié, membres de la SAGA et bons connaisseurs des « reliques » sur le terrain (Groix, Alpes). Ils ont contribué aux échanges lors des séminaires de pétrographie et nous ont apporté de précieux échantillons.

Un grand merci à Annie Cornée, dont la patience est inépuisable et la compétence d'éditrice si précieuse.

Bibliographie

Agard P. et Plunder A., 2020. Subduction et obduction : le destin de la lithosphère océanique vu à travers ses reliques (schistes bleus, éclogites, ophiolites). *Géochronique*, hors-série 1, *Les sciences de la Terre au lycée*, p. 47-64.

Kornprobst J., 2007. Métamorphisme et roches métamorphiques, signification géodynamique. Dunod éd., 3^e édition, XII + 235 pages.

Le Bayon B., 2020. De l'extension à la compression, une excursion géologique dans les Alpes occidentales au plus près des principaux processus géologiques. *Géochronique*, hors-série 1, *Les sciences de la Terre au lycée*, p. 82-93.