

6. DESTABILISATION DES GRENATS – KELYPHITISATION-SYMPLECTISATION

Les grenats ont des domaines de stabilité PT très étendus. Cependant, les conditions rencontrées en surface, appelées conditions normales de pression et de température (0°C-1atm), sont en dehors des domaines de stabilité des grenats. On dit que les grenats sont dans des conditions métastables. Bien que pour des raisons cinétiques (durées courtes) et enthalpiques (température basse), les grenats que nous ramassons ne semblent pas réagir, sur des temps géologiques, et avec des températures de l'ordre de quelques centaines de degrés, les grenats peuvent être déstabilisés et se décomposer. C'est le mécanisme de kélyphitisation.

6.1 Définitions – Etymologie

Kélyphite, n.f. est un terme définissant une texture pétrographique qui fait référence à une intercroissance fibreuse à grains fins de plusieurs phases telles que pyroxène, spinelle et amphibole, formant généralement une couronne entourant le grenat.

Le nom de «kélyphite» a été inventé par Schrauf (1882) d'après un mot grec κελυφος, signifiant «coquille». La reconnaissance de la structure de la coquille est importante dans la compréhension du mécanisme de réaction tel que discuté dans ce paragraphe. A l'origine, Schrauf pensait que la kélyphite représentait une phase unique homogène, mais il devint rapidement évident qu'il s'agissait en fait, d'un agrégat minéral à grains fins.

Texturalement, le kélyphite semble être un produit de dégradation du grenat, mais il est rarement isochimique; ce qui implique que la réaction de décomposition est un phénomène de système chimique ouvert impliquant un transfert significatif de matière dans la zone de réaction (Obata, 1994; Godard & Martin, 2000).

Symplectite, n.f. est un terme plus général qualifiant une texture due à la rencontre de deux minéraux. Il peut se référer à des grains fins, mais plus généralement à des grains plus grossiers que dans les kélyphites, à une intercroissance vermiculaire de minéraux, qui peut ou peut ne pas montrer de structure radiale comme les kélyphites. Il peut également s'agir d'un produit de dégradation de phases primaires telles que le grenat, le pyroxène alumineux ou d'autres protophases; ou enfin un produit de réaction entre deux phases incompatibles telles que l'olivine et le plagioclase à haute pression (Kretz, 1994).

Par conséquent, la kélyphite peut être considérée comme une variété particulière de symplectite, exclusivement réservée au cas des grenats.

6.2 Intérêt des kélyphites et des symplectites

Considérant la grande diversité possible de types de phases primaires, de compositions chimiques des roches et de parcours PT suivis, il existe une multitude de variétés minéralogiques et de microstructures (textures) de kélyphites et de symplectites différentes.

Cette diversité a pour effet de fasciner de nombreux pétrologues et de les pousser à publier des travaux analytiques fondés sur des observations particulièrement minutieuses. La motivation pour l'étude de ces textures de réaction est double:

- Elles fournissent potentiellement une mine de renseignements sur l'histoire métamorphique des roches mères, y compris les parcours PT que les roches ont suivis, qui peuvent encore apporter des implications géotectoniques significatives
- Elles améliorent notre compréhension des processus et mécanismes des réactions métamorphiques, un autre sujet important de pétrologie.

Les kélyphites et les symplectites sont des objets idéaux pour étudier les mécanismes des réactions liés au métamorphisme, en particulier lorsqu'il est possible d'observer conjointement les réactifs et les produits des réactions dans des espaces aussi confinés qu'ils peuvent être observés sur une même lame mince, et formant ce qui semble être un système chimiquement fermé (Mongkoltip & Ashworth, 1983; Obata, 1994).

Je vais donc reprendre l'article « Kélyphite and symplectite : textural and mineralogical diversities and universality, and a new dynamic view of their structural formation » écrit par Masaaki Obata du département de géologie et de minéralogie de l'université de Kyoto, qui a repris l'essentiel des travaux antérieurs sur la kélyphitisation et les a appliqués à des cas particuliers, y compris aux perlites d'acier, mais que je n'aborderai pas. En outre, les premiers travaux sur les kélyphites réalisés par Godard & Martin (2000) n'ont pas été

considérés dans cet article, qui traite préférentiellement des travaux d'Obata (2007), Naemura et coll. (2009), Medaris et coll. (2009), Dégi et coll. (2010) et Obata & Ozawa (2011).

6.3 Caractéristiques générales des kélyphites et des symplectites

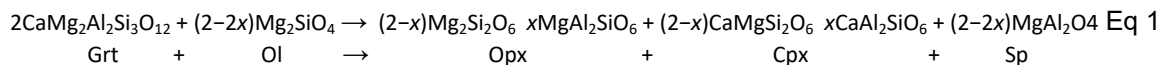
6.3.1. Aspects minéralogiques

Obata (2011) a classé les kélyphites, par souci de description, en deux types selon la nature de leur roche mère :

- Type1 : kélyphite développée dans des peridotites à grenats, dans lesquelles l'olivine est une phase en excès (roche ultra-mafique);
- Type2 : kélyphite développée dans des roches mafiques sans olivine telles que les eclogites, les pyroxénites à grenats ou les granulites à grenats.

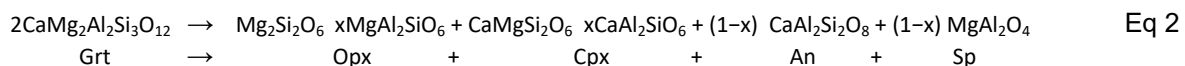
Bien que ces deux types aient pour convergence, la disparition du grenat (d'où la qualification de kélyphite), il a été souligné dès les premières études (par exemple, Becke, 1882) que la kélyphite de type 1 n'est pas simplement un produit de dégradation du grenat, mais doit être considérée comme un produit de réaction entre grenat et olivine; tandis que la kélyphite de type 2 est un produit de décomposition du grenat, qui peut être ou ne pas être, associé à un transfert significatif de matière dans les zones de kélyphitisation.

L'association minérale typique du type 1 est spinelle (Sp) + orthopyroxène (Opx) + clinopyroxène (Cpx). L'amphibole-Ca est une phase accessoire courante et peut se former localement à la place du clinopyroxène. L'origine de cette association a été interprétée en termes de réaction de la manière suivante (Eq1):



Pour une composition du grenat correspondant à la solution solide Py2Gr1 (2 pyropes, 1 grossulaire en rapport moléculaire), et x représentant la teneur en Al des pyroxènes exprimés en tant que composants des pyroxènes de Tschermak ($\text{MgAl}_2\text{SiO}_6$ et $\text{CaAl}_2\text{SiO}_6$) (Kushiro & Yoder, 1966). Pour des raisons de simplification, x est supposé être le même pour les deux pyroxènes. Il convient de noter que la solubilité mutuelle entre OPX et CPX n'est pas prise en compte dans l'expression ci-dessus.

L'association minérale de type 2 est typiquement Opx + An + Sp avec ou sans Cpx et amphibole-Ca. L'origine de cette association peut être attribuée à une autre réaction (Eq2):



Cet équilibre (Eq2) intervient pour des pressions inférieures à celles de la réaction Eq1 (Kushiro & Yoder, 1966). Il convient de noter que le Cpx peut ne pas se former si le grenat originel est moins calcique que la composition initiale Py2Gr1, dans ce cas l'équation 2 s'écrit :



6.3.2. Quelques structures caractéristiques de kélyphite

Les caractéristiques microstructurales des deux types de kélyphites vont être expliqués à partir d'exemples illustrés (fig. 14 à 17). Bien que les deux types de kélyphite montrent tous deux une structure fibreuse et radiale prononcée, ils présentent néanmoins des différences importantes de texture et de minéralogie.

Le type 1 de kélyphite consiste en une fine ceinture (env. 100 microns d'épaisseur) de pyroxénite à grains grossiers, constituée principalement d'Opx (dont les grains mesurent quelques centaines de microns), qui sera appelée «COR» (abréviation de Coarse Opx Rim) (Obata & Ozawa, 2011), séparant la partie fibreuse interne à grains fins, la kélyphite stricto-sensu, de la matrice d'olivine environnante (fig. 14)

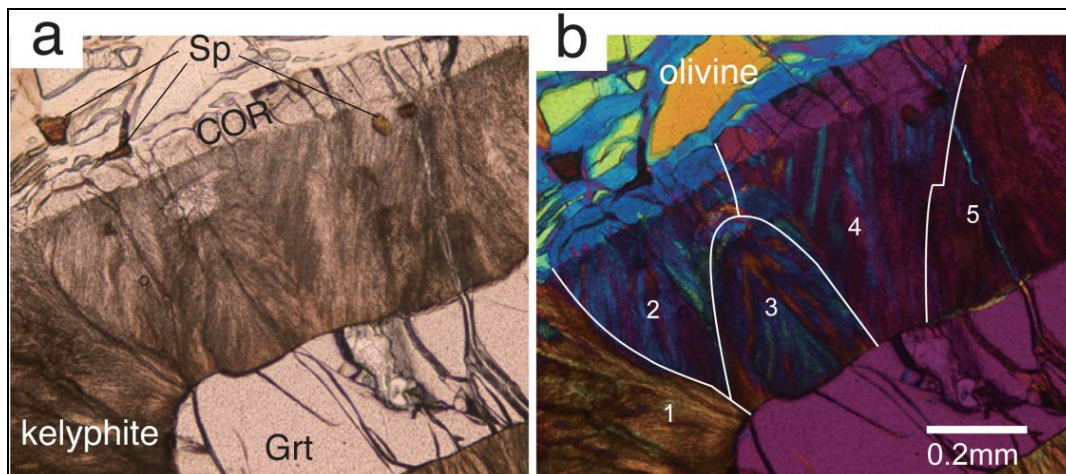


Figure 14 : Kélyphite : Microphotographies de kélyphite de type 1, péridotite à grenats, Ugelvik, Norvège
 a) lumière polarisée plane;
 b) lumière polarisée croisée avec plaque de gypse insérée pour éclairer la structure du domaine kélyphitique.

Il est majoritairement admis, et ce depuis les premières études des kélyphites (voir références dans Godard & Martin, 2000), que l'olivine participe à la formation du COR, et que, par conséquent, le COR ne peut se former que là où l'olivine est présente. De plus, Obata (2011)

des électrons rétrodiffusés (EBSD) montre que ces spinelles nodulaires et les spinelles fibreuses adjacentes partagent la même orientation cristallographique.

Bien que les deux types de kélyphites soient principalement radiales à partir du grenat, elles ne sont pas exemptes de certaines irrégularités structurelles ou incohérences internes, qui sont plus facilement observables en lumière transmise en microscopie optique (fig.14 et 15). Elles ont montré une autre caractéristique commune des kélyphites, à savoir que des petits spinelles nodulaires, répartis discrètement, se forment sporadiquement aux limites entre la zone interne (kélyphite) et le COR, ou du moins autour (fig.14 et 16 a).

Le spinelle nodulaire est davantage chromifère et semble être relié à des spinelles fibreuses adjacentes, moins chromifères, dans la kélyphite. L'analyse préliminaire d'Obata en diffraction ont été surlignées sur les croquis de la fig. 18. Certaines kélyphites contiennent plusieurs lignes de discontinuités internes, délimitant ainsi des zones homogènes mais dont la direction de linéation (des spinelles) change brusquement à leur frontière. En lumière polarisée, ces différentes zones d'orientation sont mises en évidence. Bien que les couleurs d'interférence diffèrent peu d'une zone à l'autre, l'interface est néanmoins très visible (figures 14b et 15b).

Ces lignes doivent représenter les intersections des plans de discontinuité tridimensionnels et le plan de la lame mince. Ce plan incurvé de discontinuité structurelle présent dans le volume de la kélyphite est appelé «non-conformité» dans ce paragraphe. Ces interfaces partent d'angles aigus (arêtes) des grenats, et forment des points triples entre deux zones de kélyphites et le grenat.

Nous notons également que la linéation de la kélyphite, qui est définie par des lamelles ou des "cordes" de spinelle est toujours normale aux faces du grenat sur le front des réactions. Lorsque les faces du grenat présentent une courbure, ce qui est souvent le cas, les fibres de spinelle changent leur direction en conséquence pour rester localement perpendiculaire à la surface du grenat (fig.18). Ces plans de discontinuité représentent les limites du domaine de kélyphite comme décrit ci-dessous. Puisque la kélyphitisation apparaît sur le côté le plus externe du grenat et avante vers l'intérieur, le plan discontinu émerge à un certain point critique CP formant un point singulier sur la surface du grenat comme illustré, en figure 25.

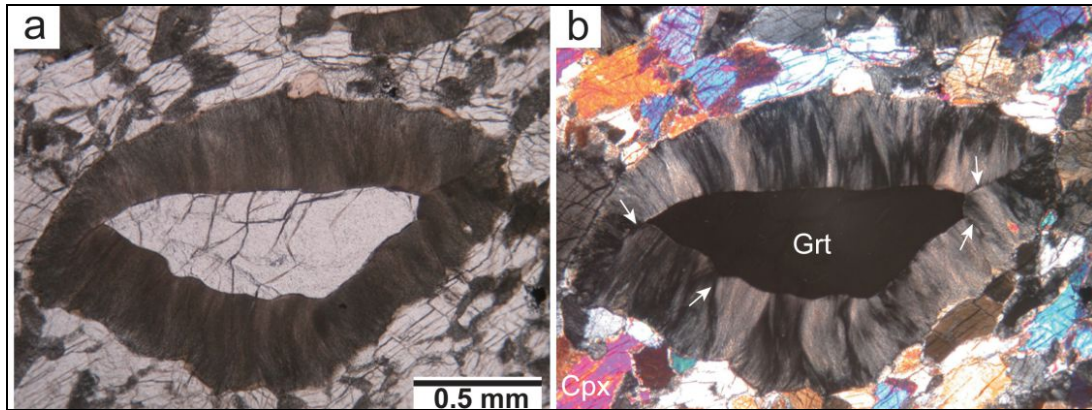


Figure 15 : Kélyphite : Microphotographies de kélyphite de type 2 d'une clinopyroxénite à grenats, Ronda, Espagne.

- a) lumière polarisée plane;
- b) lumière polarisée croisée.

Les flèches blanches indiquent les plans de discontinuité (c.-à-d. les non-conformités), Obata (2007)

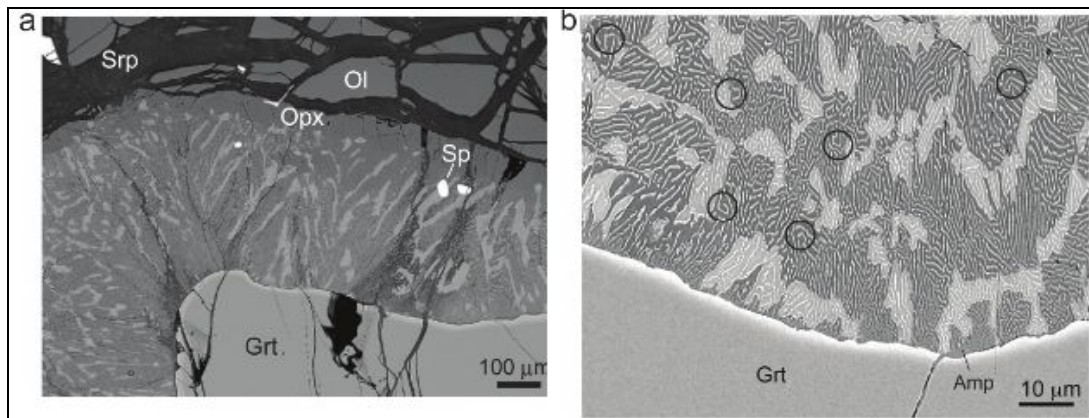


Figure 16 : Kélyphite : Images électroniques par électrons rétro-diffusés (ESB) de kélyphites de type 1 intercroissances vermiculaires d'OpX, de Cpx et de spinelle

- a) Peridotite à grenats, Ugelvik;

- b) Péridotite à grenats, Plešovice, République tchèque (Naemura et al., 2009).

Les "cordes", lumineuses sont des spinelles; plaques gris clair : Cpx; fond gris foncé : Opx, Srp : serpentine
Une amphibole mineure (Amp) se forme en surface du grenat.

L'Opx forme un seul cristal de grande dimension.

Les cercles repèrent les convolutions des spinelles lamellés (b).

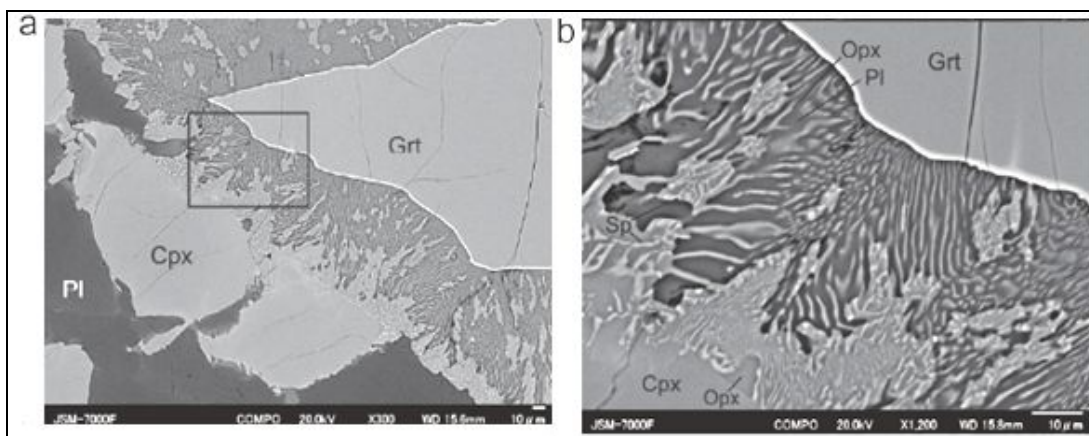


Figure 17 : Kélyphite : Images ESB de kélyphite de type 2, Ronda (même échantillon que précédemment)

- a) Les «cordes» fines brillantes sont des spinelles; lamelles grises : Opx; fond gris foncé : Pl.

- b) agrandissement de la zone encadrée

Les Cpx à côté de la kélyphite est une phase primaire

6.3.3. Structures en domaines

Une autre particularité importante de la kélyphite de type 1, mentionnée pour la première fois par Obata & Ozawa (2011), est que cette kélyphite a une microstructure fractionnée en domaines, dans laquelle chaque domaine est constitué d'un grand cristal unique d'Opx renfermant plusieurs petits cristaux de Cpx aux formes irrégulières (Fig. 16). Les Opx et Cpx contiennent de nombreuses lamelles minces vermiculaires ou «rubanées» de spinelle, régulièrement espacées, formant un symplectite de pyroxène-spinelle à l'échelle microscopique (Fig. 16b).

Cette structure en domaine d'Opx est difficilement discernable en optique, même en lumière polarisée croisée (Fig. 14), mais la nature mono-cristalline de l'Opx est confirmée à l'aide de l'EBSD (Fig. 21a; Obata & Ozawa, 2011). Par conséquent, c'est le spinelle et non les pyroxènes qui donne cet aspect fibreux aux kélyphites. Et chaque domaine d'Opx a sa propre structure interne coréelée à la linéation des lamelles de spinelle.

Ces lamelles de spinelle ont des épaisseurs remarquablement constantes et sont régulièrement espacées. En regardant de plus près, cependant, les lamelles de spinelle ne sont pas nécessairement droites mais, peuvent localement dessiner des structures incurvées, voire convoluées (Fig. 16b). Elles tendent à «envelopper» ou «contourner» les grains de Cpx qui résident à l'intérieur de l'Opx. Il convient de noter que, par rapport au spinelle lamellaire, les grains de Cpx ne sont pas allongés et, par conséquent, ne contribuent pas nécessairement à l'aspect fibreux de la kélyphite (Fig. 16b). La microscopie optique et l'analyse EBSD révèlent que le domaine de l'Opx dans la kélyphite est continue avec le COR-OPX adjacent, gardant la même orientation cristallographique. Ils forment ainsi un cristal unique d'Opx de grande dimension (Fig. 14b; Fig. 8a).

Par la suite, ce cristal unique étendu d'Opx, couvrant à la fois la partie fibreuse kélyphitique et le COR, sera appelé «cellule». Il s'agit en effet, d'une unité de croissance essentielle de la kélyphite.

Dans la kélyphite de type 2, la phase matricielle est constituée de plagioclase (typiquement de l'anorthite quasi pure) et non de l'Opx comme pour le type 1. Le plagioclase contient de nombreuses lamelles minces ou "cordes" faiblement espacées d'Opx définissant des linéations claires résultant de la structure radiale et fibreuse (Fig. 15). Ces lamelles d'Opx croissent localement vers de plus grands domaines qui contiennent des intercroissances vermiculaires très fines de spinelles de moins de 1 µm d'épaisseur (Fig. 17b). Ces domaines d'Opx tendent à s'agrandir et à se multiplier lorsque l'observateur se déplace vers l'extérieur de la kélyphite. La tendance en ce que le spinelle ne se forme que dans les grands domaines d'Opx ou dans des lamelles épaisses et non dans la matrice de plagioclase a également été montrée par Obata dans des échantillons provenant d'autres sites (1994; dans la pyroxénite à grenats) et par Dégi et coll. (2010; dans des xenolithes mafiques de granulites). La présence d'une structure en domaines dans ce type de kélyphite est également observable (Fig. 15b) et a été confirmée par EBSD (Obata & Ozawa).

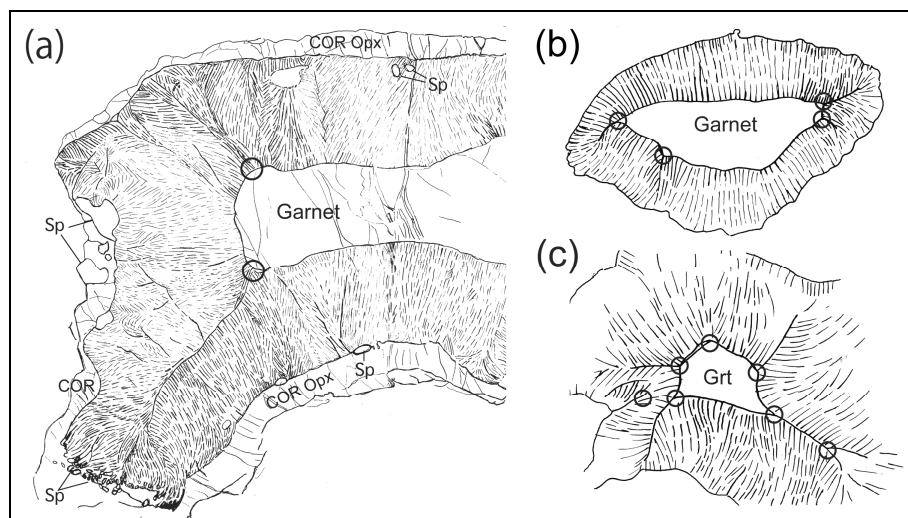


Figure 18 : Kélyphite : Croquis des structures internes des deux types de kélyphite, les discontinuités structurelles (non-conformités) et les points triples (marqués par des cercles) le long des surfaces des grenats. SP : spinelle nodulaire
 a) type 1 : péridotite à grenats norvégienne (cf. Fig. 14, 16a et 21a);
 b) et c) type 2 : pyroxénite à grenats, Ronda (cf. Fig. 15; Obata, 2007).

6.3.4. Echelles/dimensions dans les kélyphites et les symplectites

La taille des cristaux à l'intérieur des kélyphites est très variable d'un échantillon à l'autre à cause des disparités importantes qui existent entre les différents paramètres tectoniques ou de parcours P-T.

Pour les kélyphites de type 1, par exemple, nous pouvons définir au moins trois types d'échelles indépendantes pour chaque échantillon de kélyphite :

1. l'échelle des lamelles de spinelles, c'est-à-dire l'épaisseur des lamelles ou leur espacement moyen;
2. la taille moyenne des plaques de Cpx ou l'espacement moyen de ceux-ci;
3. la taille moyenne des domaines de kélyphite (c.-à-d. le cristal unique d'Opx).

L'épaisseur des lamelles de spinelles et l'espacement moyen entre elles sont interdépendants l'un de l'autre par l'intermédiaire des compositions modales moyennes et sont donc traitées comme un paramètre indépendant pour les considérations d'échelle.

Pour l'échantillon norvégien, par exemple, l'espacement moyen des lamelles de spinelles est d'environ 1 μ m; la distance moyenne entre les domaines de Cpx, mesurée le long de la périphérie de la coquille de kélyphite, est de quelques dizaines de μ m; et la taille moyenne du domaine d'Opx est de quelques centaines de μ m (fig. 16b).

L'espacement entre les lamelles de spinelles, cependant, peut différer pour différents domaines, y compris dans une même kélyphite, mais il y a une tendance à ce qu'elle diminue vers l'intérieur, c'est-à-dire proche du grenat (Fig. 16). Il semble y avoir une corrélation entre les échelles (1) et (2) et au-delà, par interférence avec les températures de formation des kélyphites; c.-à-d. plus la température est élevée, plus la taille des grains de la kélyphite est grossière (Obata et Ozawa, 2011).

Pour les kélyphites de type 2, l'échelle des dimensions correspond à :

1. l'espacement entre les lamelles d'Opx
2. la dimension des plaques d'Opx qui contiennent des spinelles vermiculaires
3. la dimension des grands domaines cristallographiquement cohérents.

En outre, pour ce type 2 de kélyphite, on pourrait rajouter une quatrième échelle :

4. les dimensions des lamelles de spinelle ultra-fines à l'intérieur des domaines d'Opx (typiquement moins de 1 μ m) (fig. 17b).

6.3.5. Similitude structurelle

Avec à l'esprit cette représentation d'échelles, il est intéressant de comparer les kélyphites à une symplectite pyroxènes-spinelles à grains beaucoup plus grossiers qui s'est formée dans une masse de péridotite à haute température à Horoman, au Japon (Takahashi - Arai, 1989; Morishita et Arai, 2003).

Bien que cette dernière n'ait pas de structure radiale comme les kélyphites et ne contient pas de grenats reliques, elle doit être considérée comme venant après la disparition du grenat (Takahashi - Arai, 1989; Morishita et Arai, 2003; Obata et coll., 1997; Odashima et coll., 2008). La microstructure de cette dernière est très similaire à celle d'un domaine de kélyphite pris isolément, bien que l'échelle soit très différente entre les deux (fig. 19). Une telle similitude microstructurale sur différentes échelles implique l'existence de processus physiques communs de formation structurelle. Sur la base de la similitude et de la relation topotaxique mentionnée ci-après, Obata et Ozawa (2011) ont proposé que la symplectite à grain grossier telle qu'observée dans la symplectite d'horoman est un cas particulier de kélyphite, dans lequel seulement un ou deux domaines (ou cellules) de kélyphite ont été formés.

6.3.6. Structure tridimensionnelle du spinelle dans la kélyphite

Les textures ne sont généralement observées qu'en coupe, c'est-à-dire en deux dimensions, et nous en déduisons leur structure tridimensionnelle (3D), à partir de superpositions d'images bidimensionnelles (2D), à l'instar d'un scanner. Morishita et coll. (2003) ont fait un pas en avant en observant directement la structure 3D des spinelles dans la symplectite d'Horoman au moyen d'imagerie de rayons X de haute résolution (tomographie informatisée), sans trancher physiquement les roches, et ont montré que les spinelles, qui apparaissaient comme de nombreux grains séparés dans une matrice de pyroxène, sont en fait, connectés les uns aux autres formant en réalité un gros grain de spinelle de forme complexe (fig. 19).

Sur la base des arguments de similitude entre différentes échelles énoncés ci-dessus, il est raisonnable de supposer que les grains de spinelle dans les kélyphites aux grains beaucoup plus fins, sont également reliés

les uns aux autres, sur une longue distance, en dimensions. La reconnaissance de la continuité des grains de spinelle est importante dans l'étude du transfert de matière par diffusion à aux limites des grains.

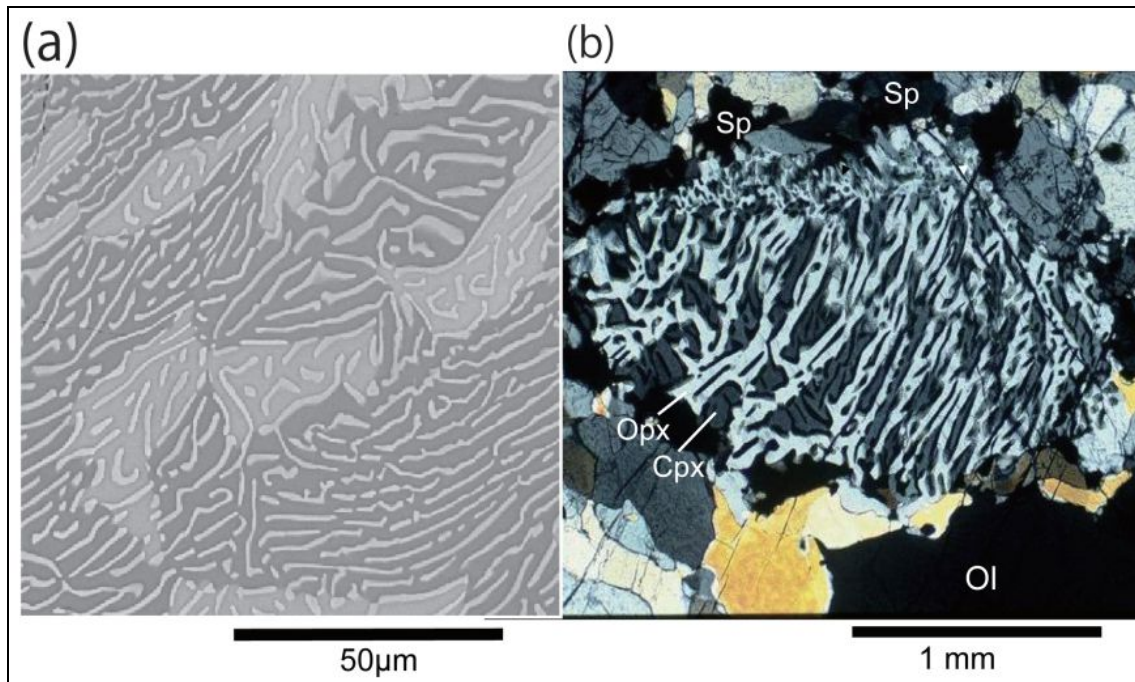


Figure 19 : Kélyphite : Microphotographies de kélyphite vs symplectite

(a) kélyphite d'une péridotite grenat norvégienne (image ESB), Obata & Ozawa (2011)

(b) Symplectite de pyroxène – spinelle d'horoman péridotite (lumière polarisée croisée), Obata (2007)

a) et b) montrent une similitude de microstructure, malgré une grande différence d'échelle entre les deux

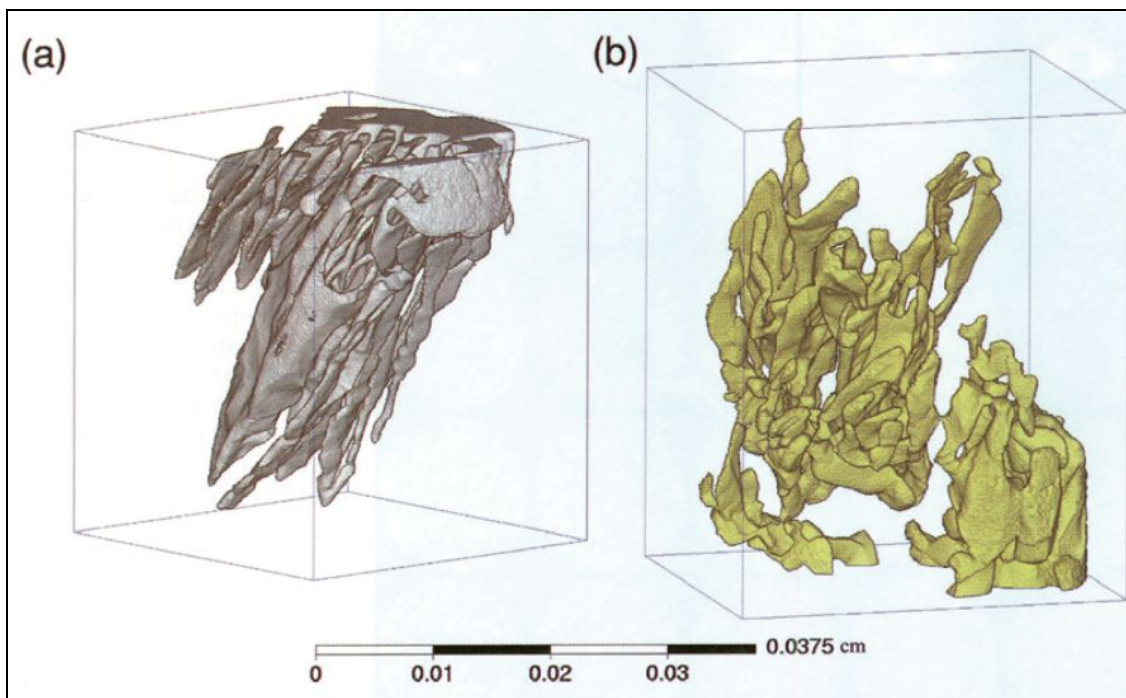


Figure 20 : Kélyphite : Images de deux grains isolés de spinelle d'une Symplectite de pyroxène – spinelle, péridotite d'Horoman, récupéré par le CT de rayon X. Morishita et coll. (2003)

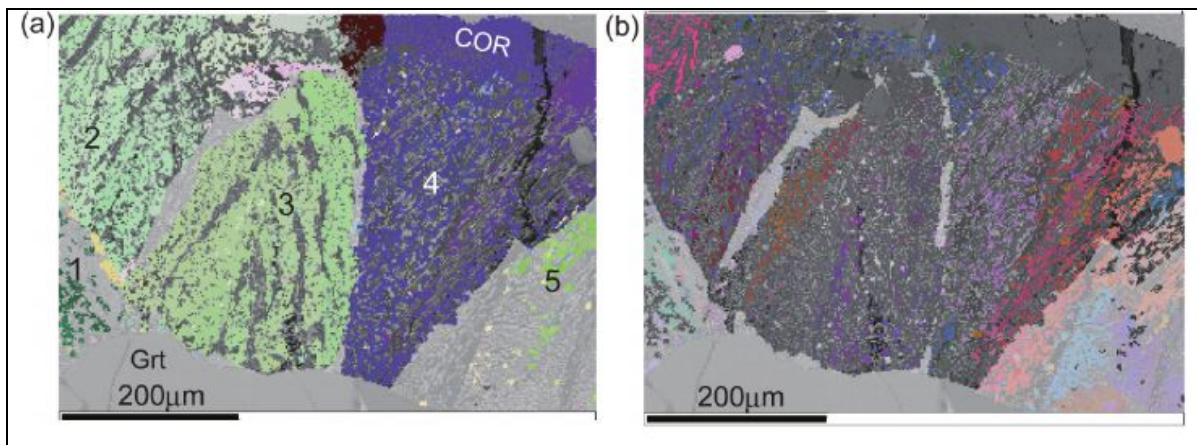


Figure 21 : Kélyphite : Cartes d'orientations cristallographiques

de l'Opx (a) et des spinelles (b) dans la kélyphite, péridotite à grenats norvégienne.

Les différentes couleurs représentent les différentes orientations minérales (angles d'Euler) déterminées par l'EBSD. Les numéros précisent les domaines Opx distincts

- a) Chaque domaine d'Opx peut être sous-dévié dans plusieurs domaines de spinelle d'orientations différentes
b) De Obata & Ozawa (2011)**

6.3.7. Relations topotaxiques

Une avancée importante a été réalisée dans les années 2000-2010 dans l'étude des symplectites pour la reconnaissance des relations cristallographiques (topotaxiques) au moyen de l'EBSD (analyse par diffraction des électrons rétro-diffusés) des minéraux constitutifs des kélyphites et symplectites (Odashima et coll., 2008; Obata et Ozawa, 2011).

Il a été montré pour les variétés de kélyphites de type 1 que chaque domaine (ou cellule) de kélyphite présente une relation topotaxique entre Opx et Cpx, qui partagent leurs plans (100) et (010) et la direction cristallographique [001].

Deux types de cellules ont été identifiés selon les relations topotaxiques entre le spinelle et les pyroxènes :

- les cellules topotaxiques, dans lesquelles l'une des faces du spinelle {111} coïncide avec la face (100) du pyroxène et l'autre de la colonne vertébrale 110 coïncide avec le pyroxène (010);
- cellules non-topotaxiques, dans lesquelles une telle relation topotaxique entre le spinelle et les pyroxènes est incomplète ou absente (Obata et Ozawa, 2011).

Il apparaît que les kélyphites qui se sont formées à des températures élevées, comme la péridotite à grenats tchèque de Mohelno (Kamei et al., 2010), ($T_f > 800^\circ\text{C}$), contiennent des cellules topotaxiques; tandis que celles dont la température de formation est plus basse ($T_f < 800^\circ\text{C}$), comme les péridotites à grenats norvégiennes d'Ugelvik, de l'île d'Otrøy (Spengler et al., 2006), sont principalement constituées de cellules non topotaxiques (fig. 21).

NOTA

Cette valeur de 800°C qui intervient comme la frontière de température entre les différentes kélyphites a été déterminée par thermométrie à deux pyroxènes (Taylor, 1998) appliquée aux pyroxènes de kélyphites (Obata et Ozawa, 2011).

La symplectite spinelle-pyroxène de la péridotite d'horoman est considérée comme représentant une cellule typique de topotaxie. Elle s'est formée après les grenats à des températures très élevées ($> 950^\circ\text{C}$) Ozawa et Takahashi, 1995; Ozawa, 2004.

Il est intéressant de noter qu'un grenat initial n'a pas de relations cristallographiques particulières avec le pyroxène ou le spinelle adjacent dans la kélyphite (Obata et Ozawa, 2011). Le COR-Opx n'a pas non plus de relation topotaxique évidente avec les olivines adjacentes, mais il est possible que la relation originale, si elle a un jour existé, ait pu être perdue lors des déformations plastiques de l'olivine et de l'Opx.

L'analyse EBSD sur le type 2 de kélyphite montre une constance de l'orientation cristallographique de l'Opx lamellaire, définissant ainsi une structure en domaines différente de celle du type 1, mais la même relation topotaxique entre Opx et spinelle qu'observée dans la kélyphite de type 1. Le grenat ne semble pas

avoir de relations topotaxiques avec le pyroxène ou le spinelle comme pour le type 1, ce qui est en accord avec les résultats obtenus par l'analyse au microscope électronique en transmission (TEM) pour une kelyphite de type 2 dans une xénolithe de granulite à grenats (Dégi et al., 2010).

6.3.8. Autres variétés de symplectites et de correspondances de réaction

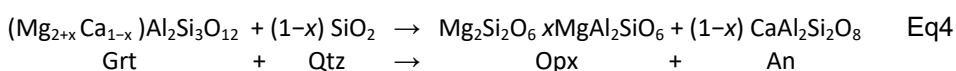
La figure 22 présente quelques exemples supplémentaires de symplectites de deux systèmes chimiques radicalement différents. a) et b) sont des symplectites de disparition des grenats dans des granulites felsiques ou pelitiques à très haute température, dans lesquels le quartz est excédentaire :

- dans la symplectite (a), le grenat est partiellement remplacé par une symplectite Opx-plagioclase, qui est incluse dans une matrice composée de quartz et de Cpx comme phases primaires (Sajeev et al., 2007).
- la symplectite b) montre une structure plus complexe où le grenat est remplacé par une symplectite de plagioclase-spinelle (hercynite), qui est encore entourée d'une matrice composée de spinelle à grains grossiers, plagioclase, feldspath alcalin, de quartz et de sillimanite, et qui est altérée en un autre type de symplectite hercynite-plagioclase (Hiroi et al., 1997).

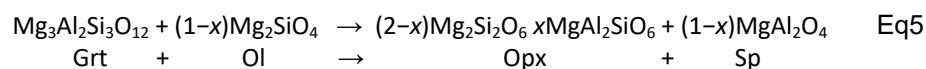
Ces symplectites, à l'exception de celle formée après la sillimanite dans (b), se sont clairement formées après le grenat et les deux montrent une structure radiale semblable à celles des kelyphites; elles sont toutes deux appelées «symplectite» dans la littérature, probablement en raison des dimensions de leurs grains grossiers. Il est intéressant de noter que dans (b), la taille du grain et la taille du domaine de la symplectite spinelle-plagioclase deviennent soudainement très réduites à proximité du grenat. On ne sait pas si un tel changement aussi brusque de la microstructure est dû à un changement des conditions physiques externes pendant la kelyphitisation, par exemple un changement de température, ou à un contrôle mécanique interne et intrinsèque du développement structurel. Notez que, malgré de telles complexités structurales, la structure fibreuse de la symplectite tend pourtant à être normale à l'avant de la réaction de disparition du grenat dans les deux cas (a) et (b), quelle que soit la forme de la courbure de la ligne d'avancement des réactions.

Il est évident, d'après les associations de minéraux des symplectites, qu'un transfert important de matière s'est produit lors de la dégradation du grenat dans les deux cas.

Dans (a), la symplectite est enveloppée par une ceinture d'Opx, telle le COR observé dans la kelyphite de type 1 pour la péridotite, mais la phase adjacente est constituée de quartz dans (a) au lieu d'olivine dans la péridotite. De l'identification des minéraux présents, la réaction globale de formation de la symplectite dans ce cas peut s'écrire ainsi ::



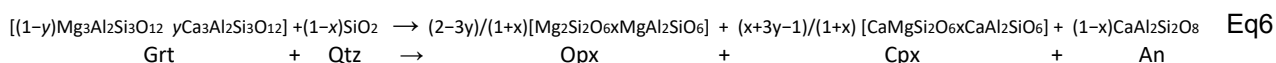
En l'absence de calcium, ce bilan Eq4 s'écrit



(MacGregor, 1974).

Il est à noter que les réactions Eq4 et Eq5 peuvent être reliées l'une à l'autre par une substitution des Qtz et An de la réaction Eq4, par Ol et Sp dans Eq5. De la même manière, le Cpx apparaît dans le système saturé en Ca pour former la réaction Eq1 dans le système de péridotite, le Cpx peut se former selon la réaction Eq4 pour des compositions appropriées de grenat.

Une expression plus générale pour la réaction Eq4 permettant l'apparition de Cpx peut alors être écrite ainsi



où x et y représentent respectivement les teneurs en Al et Ca dans le pyroxène et le grenat. Comme il a été cartographié pour les coefficients d'Opx et de Cpx de la réaction ci-dessus dans le système de coordonnées x-y (fig. 23),

Cpx a une valeur négative du coefficient de réaction dans le champ A ($x+3y-1 < 0$) et apparaît ainsi comme une phase de réaction :



Ou comme un produit dans la zone B ($x+3y-1 > 0$, $2-3y > 0$), alors :



Ou également comme un produit mais avec l'Opx comme réactif dans la zone C ($x+3y-1 > 0$, $2-3y < 0$), et l'équation devient :

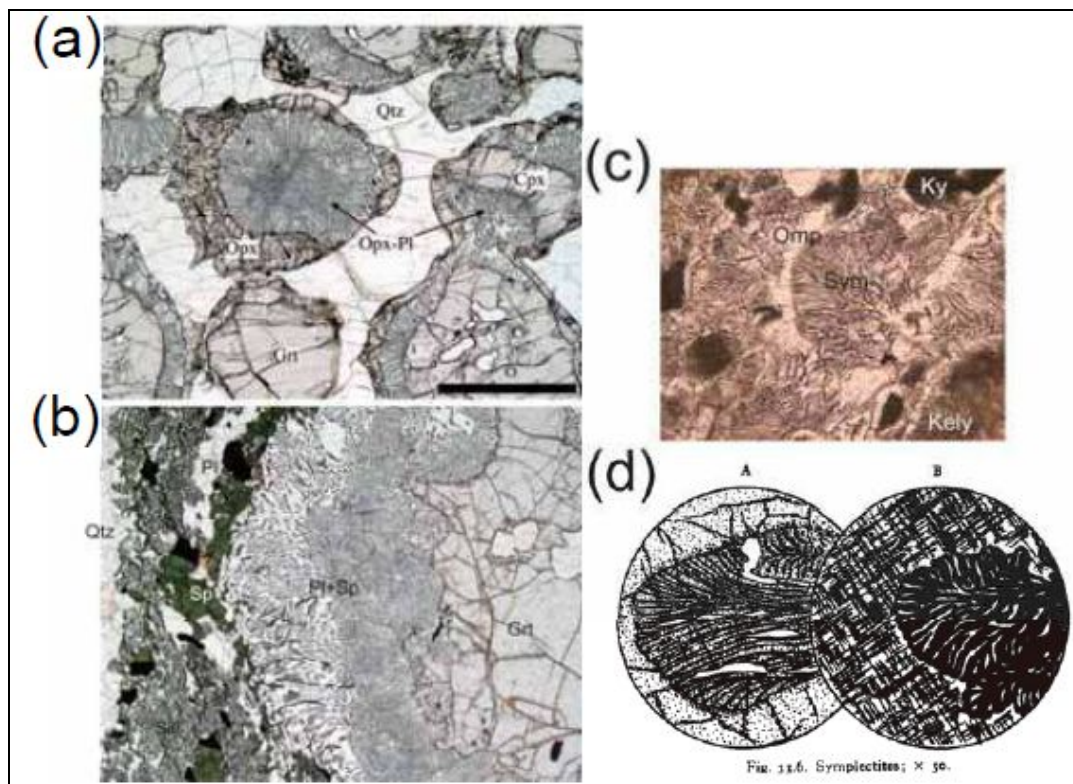
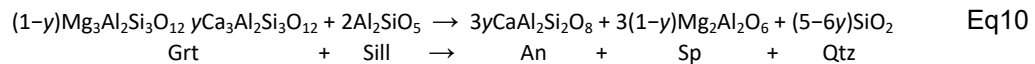


Figure 22 : Kélyphite : Microphotographies (lumière polarisée plane) et croquis de variétés de symplectites
 (a) Symplectite Opx – Plagioclases formée après le grenat, dans une granulite haute température, Sri Lanka;
 (b) Symplectite Plagioclase – Spinelle formée après le grenat dans une khondalite, Sri Lanka.
 'Sill', symplectite Pl-Sp après sillimanite. La barre d'échelle est de 1 mm pour les deux photographies (de Shuto et osanai, 2002)
 (c) Symplectite Cpx – Pl formée après omphacite (OMP), éclogite à cyanite, Nové Dvory, République tchèque.
 «Sym», Symplectite; Kely, kélyphite. 'KY', Symplectite Pl-Sp après cyanite.
 La largeur de la vue est de 1mm.
 (d) Croquis de : A), l'intercroissance «dactylitique» (semblable à un doigt) de l'hypersthène, du spinelle et de la cordiérite formée après le grenat, granulite de Madras et B) Myrmekite (Symplectite Pl – Qtz remplaçant le microcline, la lumière De Nockolds et coll. (1978)

La réaction Eq7 coïncide avec celle proposée à l'origine par Sajejev et coll. (2007), qui explique la symplectite Opx-Plagioclase également présente entre le grenat et le Cpx primaire. On prévoit que pour plus de grenats calciques (champs B et C dans la figure 23), le Cpx devient une phase produit et apparaît dans l'association de symplectite comme décrit par la réaction Eq8, qui est encore une fois analogue à la réaction Eq1 dans le système de péridotite. La réaction sans Cpx libre Eq4 est un cas particulier où le coefficient de Cpx ($x-3y-1$) est égal à zéro (juste à la limite entre les champs A et B de la fig. 23).

Suivant ce «principe de correspondance», une opération similaire peut être faite, en substituant Ol et Sp dans la réaction Eq5 avec, cette fois, respectivement sillimanite et An, pour obtenir une nouvelle réaction pour le cas (b):



Cela peut expliquer la séquence observée de minéraux: Grt / symplectite Pl-Sp / Sp / An / Sill /, où Sp (en dehors de la symplectite) et An correspondent au spinelle nodulaire et au COR-Opx, respectivement dans la kélyphite dans le cas de la péridotite (c'est-à-dire supposer que la sillimanite était une phase stable au moment de la réaction.) Notez que pour le grenat très calcique (c.-à-d., y'5/6), Qtz devient une phase réactive en tant que telle :



Le fait que différentes variétés de symplectites et de kélyphites se soient développées dans des systèmes chimiquement distincts et répondent systématiquement au «principe de correspondance» et aux opérations de «substitution» de minéraux, démontre que ces mécanismes réactionnels définis pour les péridotites, sont universels et donc constamment applicables..

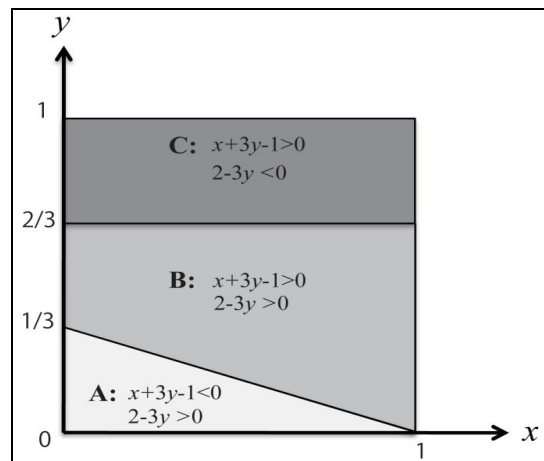


Figure 23 : Kélyphite : Coefficients de réaction (6) indiqués dans un diagramme x-y définissent trois champs dans la zone possible ($0 < x < 1, 0 < y < 1$):

- A**, le coefficient de CPX est négatif et celui de OPX positif [réaction (7)];
B, ceux de CPX et OPX sont à la fois positifs [réaction (8)];
C, celui de CPX est positif mais celui de OPX négatif [réaction (9)].

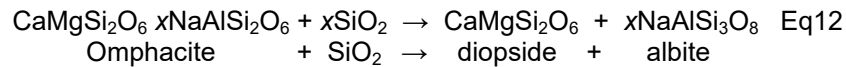
La figure 23c montre un autre exemple bien connu de symplectite où l'omphacite est partiellement décomposée en association de Cpx diopsidique et d'albite, comme on le voit habituellement dans de nombreuses eclogites de par le monde (p. ex. Vernon, 2004). La ligne de front de la réaction de la symplectisation est typiquement concave vers l'intérieur, vers l'omphacite. Les fibres de symplectite sont quasi normales au front de réaction, donnant une structure interne de symplectite ressemblant à un « chou-fleur ».

La même texture, mais avec des minéraux différents peut être vue dans le manuel standard de pétrographie (Nockolds et al., 1978) telle que reproduite en Fig. 22d. Il est intéressant de noter que, malgré la courbure (morphologique) des cristaux fibreux de pyroxène et de plagioclase, ils montrent tous les mêmes angles d'extinction respectifs, indiquant que le réseau du cristal n'a pas changé d'orientation pendant la croissance des cristaux fibreux, comme pour les spinelles dans les kélyphites.

Cette invariance de l'orientation du réseau du cristal pendant sa croissance, en dépit de ses courbures morphologiques, est également vérifiée pour les lignes de spinelles dans la kélyphite des péridotites. Une telle constance de l'orientation du réseau cristallin peut être considérée comme une autre caractéristique commune et universelle des kélyphites et des symplectites.

En termes de chimie brute, puisque le diopside et l'albite ne peuvent pas fournir les éléments chimiques qui permettrait de former de l'omphacite, il est évident que la réaction de formation de la symplectite n'est pas

isochimique et a impliqué le transfert significatif de matériau depuis l'environnant. Une expression possible de la réaction serait :



où SiO₂ représente un composant en migration.

Notez que cette réaction s'accompagne d'une augmentation de volume

6.4 La loi de la normalité

Il a été précédemment souligné que la structure fibreuse du spinelle est normale ou perpendiculaire aux faces du grenat (Dégi et coll. 2010). Cette même tendance est observée pour les symplectites formées après omphacite comme mentionnée ci-dessus. Cette tendance semble si universelle que l'auteur Masaaki Obata a décidé de l'exprimer comme une loi naturelle - la «loi de la normalité». Elle peut s'exprimer de deux façons (fig. 24) :

- 1- Expression géométrique : « la linéation des kélyphites est toujours normale à la surface du cristal de grenat (c-à-d., le front de réaction) ».
2. Expression cinématique : « la direction de croissance de la kélyphite coïncide avec la direction de mouvement du front de réaction ».

La compréhension physique de l'origine de cette loi et des incohérences de la structure (c.-à-d. les non-conformités) telles qu'elles sont observées ci-dessus doit être fondée sur des considérations relatives aux processus de réaction et aux mécanismes tels qu'ils sont mentionnés ci-dessous. Il ne faut pas oublier que la normalité doit avoir été maintenue pendant toute la durée des processus de décomposition du grenat, hormis peut-être les premiers stades de cette dégradation.

Loin du grenat, la linéation n'est pas nécessairement normale à la surface du grain. Cela signifie que la direction de croissance des lamelles de spinelles a changé à mesure que les cristaux se sont développés et que le front de réaction a tourné en conséquence, de sorte que la relation orthogonale entre la linéation du spinelle et la ligne d'avancement de la réaction instantanée qui a continué à se déplacer a toujours été maintenue (fig. 25).

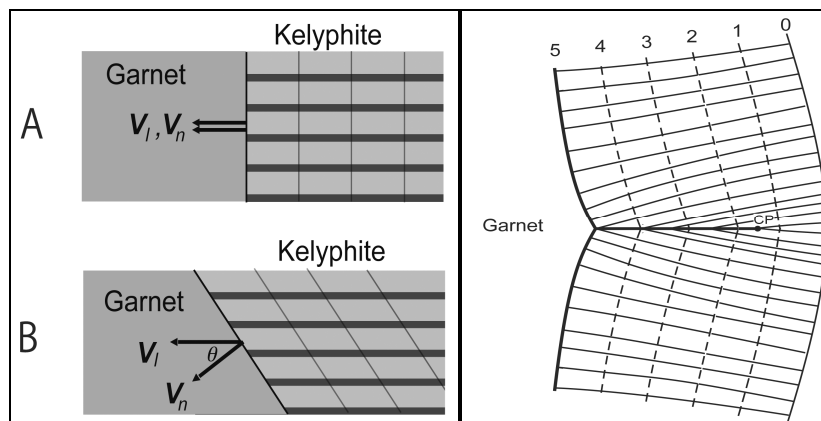


Figure 24 : Kélyphite : Illustrations de la Loi de normalité.

V_I , vecteur vitesse de la croissance cristalline des fibres;

V_n vecteur vitesse normale du front de réaction / ligne d'avancement de la réaction

Les deux vecteurs coïncident dans le cas (A), mais pas dans le cas (B)

Figure 25 : Kélyphite : Représentation de la croissance d'une «non-conformité»

La non-conformité se propage de proche en proche lorsque les kélyphites se développent à partir de deux faces voisines du grenat. Les lignes pointillées marquées de 1 à 4 représentent les faces des grenats à différents instants au cours de cette croissance. Nous pouvons voir que la non-conformité commence à se former à un point critique CP à une arête du grenat et continue à se développer à partir d'une pointe du grenat. Les linéations des spinelles (lignes fines continues) restent partout constamment normales aux lignes isochrones de croissance (obéissant à la Loi de normalité)

Toutefois, la loi de la normalité ne s'applique pas à surface primaire du grenat, c'est-à-dire à la surface entre la kélyphite à grains fins et le COR, pour lequel la linéation du spinelle est généralement oblique (Fig. 14, Fig. 16a, Fig. 18a).

6.4.1. Application de la loi de normalité

La véracité de la «loi de normalité» proposée dans l'article dont je vous propose le contenu, peut être démontrée en retraçant l'historique de rupture d'un grain isolé de grenat. La figure 26a est une microphotographie d'une kélyphite qui a complètement remplacé le grenat, avec la mise en évidence des linéations et des «non-conformités» par des lignes dessinées sur la photographie, guidées par la loi de la normalité.

A partir d'un point choisi arbitrairement dans la région des kélyphites (P sur la fig. 26b), nous pouvons dessiner un circuit fermé guidé par la loi de la normalité, de sorte que la courbe reste partout orthogonale à la linéation des spinelles. Les inflexions doivent se produire à chaque intersection avec les « non-conformités » en raison des discontinuités de linéations à chaque joint de grain. Un tel circuit représente une surface de grain de grenat isochrone à un instant donné; un nombre infini de ces circuits peuvent être dessinés de la même manière que pour la figure 26b.

La situation peut être analogue à la relation géométrique entre le champ de force (vecteur) et son champ potentiel conjugué, qui se compose d'un ensemble de surfaces équipotentielles, dans la physique du continuum comme la théorie électromagnétique ou la dynamique des fluides. Fait intéressant, la densité de ligne (ou l'espacement) des circuits varie considérablement selon les directions des surfaces, même le long du même circuit isochrone : densément espacé signifie un taux de croissance plus lent (de kélyphite) que dans la direction d'un espace davantage clairsemé.

Une telle dispersion directionnelle apparente du taux de réaction ne devient visible qu'en appliquant la loi de la normalité; ce qui soulève une question intéressante quant à savoir ce qui contrôle le taux de croissance de la kélyphite. Certes, il ne doit pas s'agir des conditions ambiantes telles que la température ou la pression lithostatique, mais plutôt des variations locales de l'activité de H_2O ou des contraintes déviatoriques comme mentionnées ci-dessous.

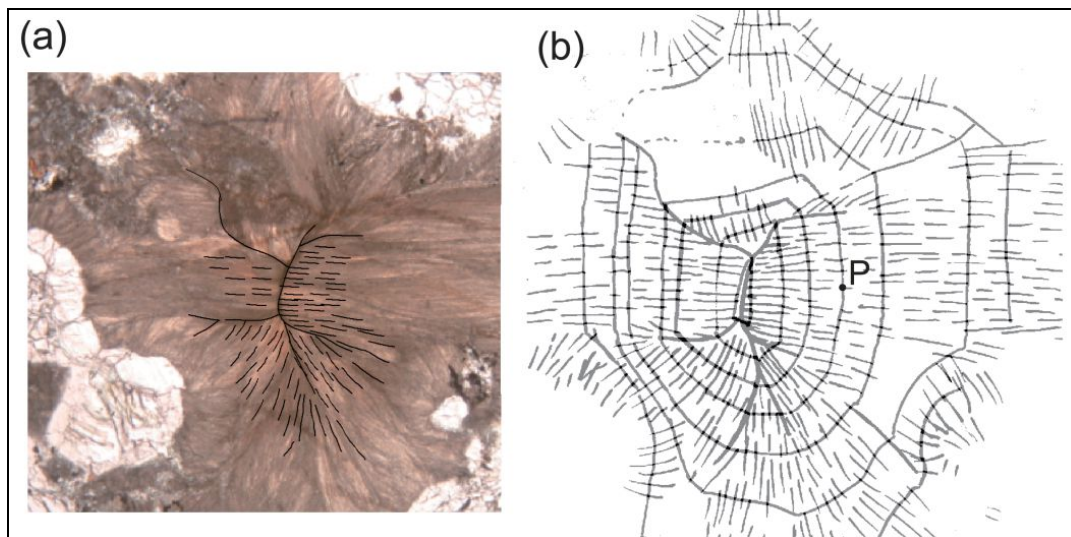


Figure 26 : Kélyphite : Microphotographie en lumière polarisé (a) et croquis correspondant (b) d'un échantillon d'une péridotite à grenats, Plešovice, République tchèque

Domaines et linéations de la kélyphite utilisés pour reconstruire les anciennes surfaces des grenats (isochrones) en appliquant la Loi de normalité.

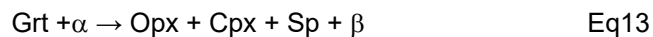
La largeur de la vue (a) est de 3 mm.

6.5 Mécanisme des réactions

6.5.1. kélyphite de type 1

Pour la kélyphite de type 1, correspondant au système péridotitique, il est bien connu que la réaction Eq1 peut avoir lieu lors d'une décompression, hors du domaine de stabilité de la péridotite à grenats vers le champ de stabilité de la péridotite à spinelle. De telles expressions de réaction, cependant, n'expliquent pas le réarrangement des éléments chimiques ni les zones minérales observées dans la kélyphite et, par conséquent, peu choses sur le mécanisme de la réaction.

Structurellement, la zone de kélyphite semble représenter le remplacement du grenat originel ; tandis que la ceinture d'Opx (COR) se forme après l'olivine. Sur une telle base d'observation, nous pouvons envisager un schéma de réactions tel qu'il est décrit à la fig. 27. Ainsi, la réaction Eq1 peut être décomposée selon les deux réactions métasomatiques suivantes :



où α et β représentent des composés mobiles inconnus ou des groupes de composés qui peuvent être produits ou consommés sur les fronts de réaction.

La réaction Eq13 se produit en définissant un front de réaction au détriment du grenat (FR1 à la fig. 27); tandis que la réaction Eq14 se produit en définissant un autre front de réaction pour la consommation de l'olivine (RF2, ibid). Il devrait y avoir un échange de ces composés entre les deux fronts de réaction à travers la zone de réaction. Un mode dominant de transfert de masse à travers la zone de réaction est probablement la diffusion à la surface du grain et non une diffusion en volume (Joesten, 1991).

Les composés α et β peuvent être identifiés par équilibrage des masses en les différents éléments chimiques en considérant les compositions de chaque minéral, mais seulement lorsque le cadre de référence est spécifié (Thompson, 1959).

Dans ce qui suit, nous traitons une réaction dans un système simplifié $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, sans calcium, pour comprendre l'essence du mécanisme physique des réactions.

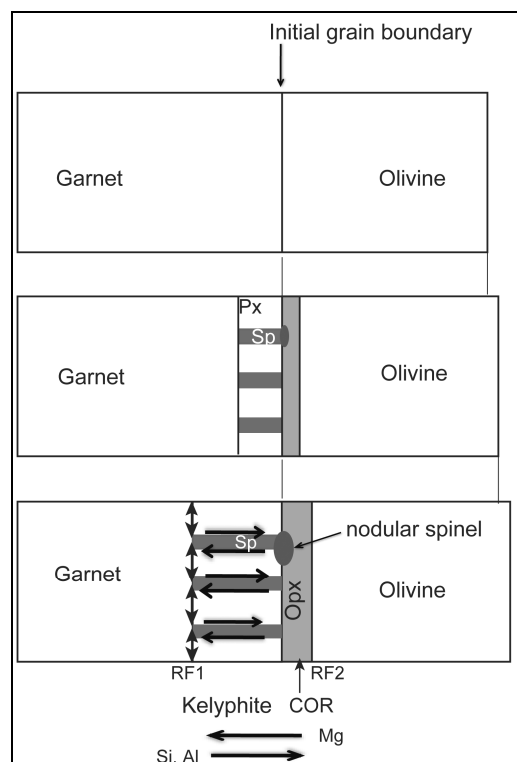
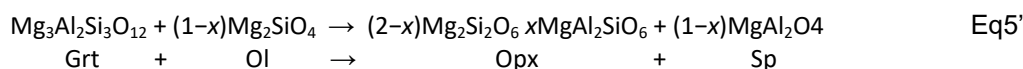


Figure 27 : Kélyphite : Modèle de croissance unidimensionnelle de kélyphite entre le grenat et l'olivine
 Les RF1/RF2 sont des fronts de réaction sur le côté du grenat et de l'olivine, respectivement.
 PX : pyroxènes (Opx et Cpx non différenciés)

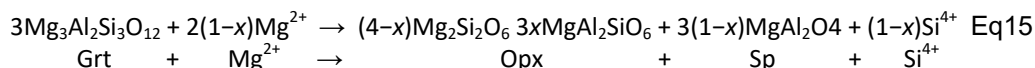
6.5.2. Modèle des réactions dans le système MgO–Al₂O₃–SiO₂

Un modèle de réaction correspondant à la réaction Eq1 dans le système MgO–Al₂O₃–SiO₂ serait:

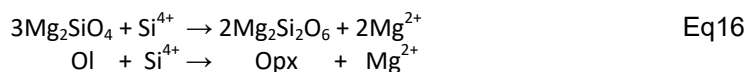


où x est la teneur en Al de l'Opx, elle est déterminée par les conditions de pression et de température de l'équilibre (par ex., Bois et Banno, 1973).

Par conséquent, des versions sans Ca des réactions Eq3 et Eq4, peuvent être écrites, en utilisant le cadre de référence fixé à l'oxygène:



et



A noter que le nombre d'oxygène est conservé en phases solides pour les deux réactions. Une combinaison linéaire des réactions Eq15 et Eq16 donne la réaction globale Eq5' pour un système fermé.

A noter que les réactions Eq5' et Eq15 sont toutes deux des réactions qui s'accompagne d'une augmentation de volume (pour x=0, $\Delta V(5')=8,63 \text{ cm}^3$, $\Delta V(15)=31,02 \text{ cm}^3$ ou 9,13% Grt), tandis que la réaction Eq16 s'accompagne d'une diminution de volume ($\Delta V(16)=-5,13 \text{ cm}^3$ ou -3,92% olivine)

Une image physique de la réaction est alors représentée comme suit : le grenat réagit au front de réaction avec Mg^{2+} fourni du côté de l'olivine, le pyroxène et le spinelle précipitent alors, remplaçant Si^{4+} , qui est immédiatement retiré du site et transféré vers le côté olivine (fig. 27). L'olivine d'autre part est remplacé par l'Opx qui va réagir avec Si^{4+} , et libérer Mg^{2+} . La frontière entre la kelyphite et le COR représente la surface du grain de grenat originel. Au front de réaction RF1, le grenat est constamment remplacé par l'intercroissance du pyroxène et de spinelle (c.-à-d. de la kelyphite), ainsi la ségrégation se produit et les matériaux doivent être réorganisés par transfert de matière à courte distance, tangentiellement, le long de la surface du grain de grenat (Fig. 27).

L'échelle de l'intercroissance (ou de l'espacement des lamelles de spinelle) doit être régie par la mobilité ou la diffusion des éléments le long des surfaces du grain de grenat par rapport au taux de migration (unidimensionnel) du front de réaction, c'est-à-dire le taux de croissance de la kelyphite. Sous des températures plus élevées, la diffusion deviendrait plus rapide parce que la diffusion augmente de façon exponentielle avec la température et que, par conséquent, des kelyphites à grains plus grossier (ou des symplectites) en résulteraient.

Il est souligné que les réactions discontinues ne se produisent que sur les fronts de réaction, RF1 et RF2 dans ce modèle, et la zone de kelyphite produite fonctionne uniquement comme un moyen de transport diffusionnel des éléments. Le mécanisme dominant de ce transfert de matériaux axiaux à longue portée est la diffusion à la surface du grain. L'agent de diffusion n'est pas clair, mais si de l'eau ou du liquide est présent à la surface du grain, même en quantité infime, la diffusion en serait grandement facilitée. La variation locale de l'étendue de la kelyphitisation du grenat comme on l'observe fréquemment dans la nature suggère qu'un fluide occupe bien un rôle critique dans le mécanisme des réactions de kelyphitisation.

Il convient de noter que, lors de la réaction Eq15, Al est conservé ainsi que l'oxygène et, que par conséquent, il n'y a ni gain ni perte d'Al. Toutefois, l'analyse de l'équilibre de masse à l'aide d'analyses réelles des grenats et des compositions brutes de kelyphites naturelles, montrent qu'il y a une perte significative d'Al des grenats, ce qui signifie qu'il y a un flux d'Al loin du front de réaction du côté grenat (RF1). Cette incohérence peut être conciliée en considérant la croissance du spinelle nodulaire comme puits d'Al.

6.6 Le problème de volume

La structure de linéation normale à l'avant de la réaction (du côté grenat) serait favorable compte tenu de l'efficacité du transfert de matière par la diffusion à la surface du grain. Mais une telle considération ne suffit pas à expliquer l'origine de la «loi de la normalité». Plus restreinte, une sorte de contraintes physiques doit être opérationnelle pour contrôler l'orientation de la croissance du cristal. Massaki Obata a envisagé, pour l'origine d'une telle force de contrôle, l'excès de contrainte qui peut être généré sur le front de réaction. Une

réaction discontinue telle que la réaction Eq15 produit une augmentation de volume. Rappelez-vous que la kélyphite est un matériau solide composé de symplectites pyroxène-spinelle encerclant le grenat comme une «coquille». L'augmentation de volume libre n'est donc pas possible à l'intérieur de la coquille de kélyphite (Fig. 28). Au contraire, le volume peut être maintenu constant par les réactions de transformation, pour lesquelles certains matériaux doivent sortir du système.

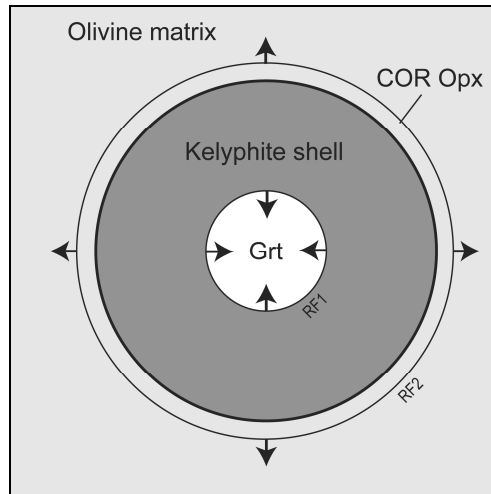
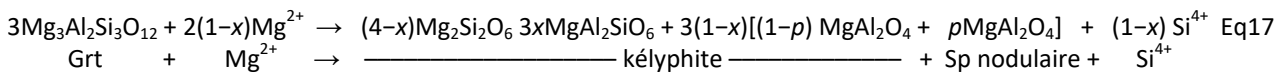


Figure 28 : Kélyphite : Illustration schématique montrant la croissance vers l'intérieur d'une coque de kélyphite et la croissance vers l'extérieur du COR

Une possibilité pour répondre à l'exigence de la conservation du volume, compte tenu de la présence du spinelle nodulaire à la frontière entre la kélyphite et le COR, serait de diviser la formation du spinelle présenté selon réaction (Eq15) en deux quantités distinctes ::



où p est une nouvelle dimension pour définir les partitions du spinelle entre l'intérieur de la coquille de kélyphite et le spinelle nodulaire juste à l'extérieur de la coquille. Il est possible d'ajuster le coefficient p de sorte que la variation de volume à l'avant de réaction reste nulle

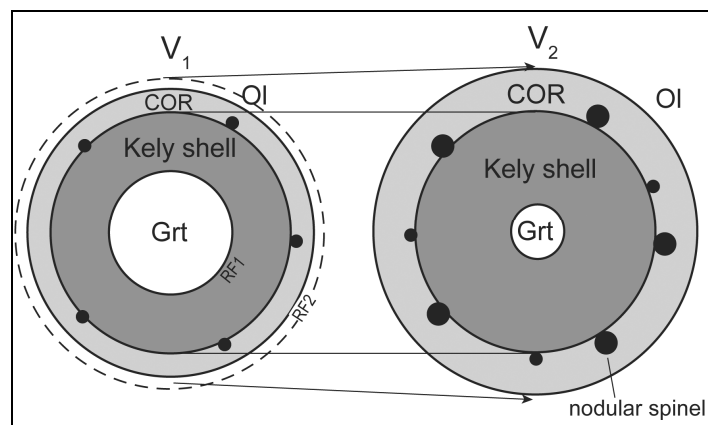


Figure 29 : Kélyphite : Croquis illustrant le changement de volume associé à la kélyphitisation du grenat
 Le diamètre de la coquille de kélyphite reste constant pendant le rétrécissement du grenat et la croissance du spinelle nodulaire et du cor.
 Le volume v_1 qui inclut l'olivine environnante, se développe en consommant de l'olivine périphérique, jusqu'au volume v_2 , ($V_2 > V_1$) dans lequel la masse totale incluse est conservé (système fermé).
 Échelles exagérées et non proportionnelles

L'idée est de supposer qu'une partie du spinelle puisse sortir de la coquille de kélyphite. Cette idée est représentée schématiquement en fig. 29, où la taille de la coquille de kélyphite est maintenue constante au cours de la kélyphitization. L'augmentation de volume des réactions Eq15 et Eq17 est maintenue à l'extérieur de la coquille de kélyphite par la croissance des spinelles nodulaires. Bien que la réaction Eq16 crée une diminution de volume, la somme des variations de volume lors des formations du spinelle nodulaire et du COR doit augmenter puisque les réactions Eq1 et Eq5 s'accompagnent d'augmentation de volume. Cette augmentation nette du volume peut être prise en compte par une déformation plastique des olivines environnantes.

6.7 Génération de contraintes internes et origine de la loi de la normalité

À la lumière de la fig.29, il est concevable que le front de réaction du côté grenat (RF1) soit constamment soumis à une contrainte considérable pendant la croissance de la kélyphite, ce qui peut contribuer en partie à la force motrice de l'écoulement vers l'extérieur du matériau. Étant donné que la surface du front de réaction est quasi constante pour une petite augmentation élémentaire de la progression de la réaction, la contrainte interne générée doit être une contrainte de compression tangentielle à la surface d'avancement de la réaction, c'est-à-dire que la valeur de la contrainte maximale est tangentielle. Il est bien connu que le module élastique brut de la structure lamellaire composé par les différents modules élastiques est minimum dans la direction normale au laminage, par conséquent, le potentiel élastique proche de la région en avant de la réaction est réduit au minimum pour une configuration normale, prouvant qu'il s'agit mécaniquement de la géométrie la plus stable.

Obata interprète donc qu'une telle contrainte non hydrostatique générée constamment sur le front de réaction en mouvement, doit être la principale force qui contrôle et guide la direction de croissance de la structure lamellaire de la kélyphite.

En outre, les plaques de Cpx incluses dans la kélyphite-Opx, ne sont pas nécessairement allongées comme les spinelles et ne semblent donc pas obéir à la loi de la normalité. Le contraste des modules élastiques entre Opx et Cpx est bien moindre que celui entre les modules du pyroxène et du spinelle (Anderson et al., 1968), et donc la morphologie des plaques de Cpx devrait être moins sensible au champ de contraintes que les lamelles de spinelles.

De telles considérations sur des contrastes morphologiques entre le pyroxène et le spinelle étayent l'hypothèse d'Obata quant à l'origine de la loi de la normalité.

La loi de la normalité peut être réalisée dans n'importe quel autre système de réaction, dans lequel l'augmentation du volume est impliquée. Par exemple, la symplectite formée après l'omphacite comme mentionnée ci-dessus, ou même le myrmekite, une intercroissance de symplectite de quartz et de plagioclase remplaçant le K-feldspath, généralement développée dans des systèmes granitiques (Fig. 22d).

6.8 Une synthèse : une nouvelle vision de la formation de kélyphites

Résumant les connaissances et les considérations précédentes, Masaaki Obata a pu dégager une image nouvelle et dynamique de la formation et la croissance de la kélyphite de type 1.

6.8.1. Cellules et colonie de kélyphite

Il a été souligné précédemment que chaque «cellule» de kélyphite peut être considérée comme représentant une unité de croissance d'une kélyphite.

Une kélyphite, dans son ensemble et sa complexité, se compose généralement de nombreuses «cellules», et pour cette raison, on parle de «colonie» (fig. 30), dans le sens où elle représente une unité de croissance macroscopique de l'ensemble. En trois dimensions, ces cellules sont tubulaires et se rassemblent formant une structure en nid d'abeilles comme une colonie, qui croît vers l'intérieur en consommant le grenat. La cellule a sa structure interne et ses fonctions. La base (ou la matrice) de la cellule est un cristal unique d'Opx bien que; la cellule reste composée de deux éléments :

- a) Une partie fibreuse à grains fins (c.-à-d. la kélyphite, sensu stricto) formées par un grand nombre de fibres fines de spinelle et plusieurs petits grains de Cpx dispersés dans le cristal unitaire d'Opx,
- b) une partie claire, le COR, qui est exempte de fibres de spinelles (Fig. 30).

Les spinelles nodulaires peuvent ou non résider à la jonction ou aux alentours des deux entités (a) et (b). La cellule tubulaire a une polarité distincte de telle sorte que l'entité (a) croît vers l'intérieur en « grignotant » le grenat à une extrémité, tandis que l'entité (b) se développe vers l'extérieur au détriment de l'olivine. La croissance de la cellule est accompagnée du flux intra-cellulaire de matière le long de la direction axiale des tubules. Le flux important de (b) à (a), c'est-à-dire de l'olivine vers le grenat, est constitué de Mg^{2+} , tandis que les flux de matière à contre courant sont constitués d' Al^{3+} et Si^{4+} . Une partie de l' Al^{3+} peut cependant être consommée à la jonction ou près de la jonction des deux parties par la croissance des grains de spinelle nodulaire. Le mécanisme d'une telle migration intra-cellulaire de matière est probablement de la diffusion le long des surfaces des fibres de spinelles.

La continuité des fibres de spinelles tout le long de la cellule est donc une géométrie nécessaire. Comme mentionné précédemment, la contrainte accumulée pendant la croissance de la kélyphite augmente l'énergie potentielle élastique de cette dernière et peut éventuellement limiter voire arrêter la réaction.

Cette augmentation de l'énergie interne peut être ajustée par un matériau qui s'écoule de la coquille de kélyphite et par l'expansion du volume de l'entité (b), qui est permise par des déformations plastiques du COR et de la matrice d'olivine externe. Il est donc concevable que la croissance de la « colonie » de kélyphite dans son ensemble soit contrôlée par le taux de libération de contraintes par déformations plastiques de l'environnement qui se manifeste dans le flux ductile de roches à l'échelle macroscopique. Il est à noter que certaines cellules tubulaires peuvent rétrécir et éventuellement disparaître à mesure que la colonie se développe vers l'intérieur (fig. 30) - un processus connu sous le nom de sélection géométrique (Grigoriev, 1965).

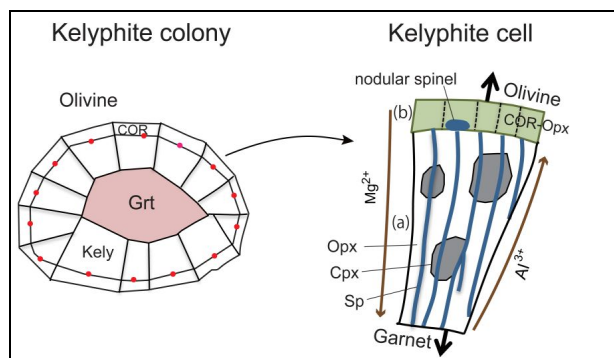


Figure 30 : Kélyphite : Images conceptuelles d'une « colonie » de kélyphite composée de plusieurs cellules tubulaires (à gauche) et de la structure interne d'une « cellule » et de ses fonctions (à droite).

Les taches rouges sur la figure gauche indiquent où la nucléation de la cellule s'est produite

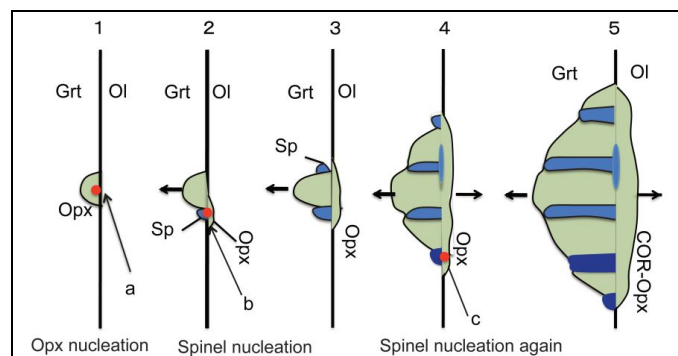


Figure 31 : Kélyphite : Image schématique illustrant la nucléation et la croissance eutectoïdale subséquente d'une cellule de kélyphite.

- (1) Opx nucléalise initialement à la limite du grain d'origine (au point «a») et commence à croître vers le grenat;
- (2) nucléi de spinelle à une jonction triphasée: Grt-Opx-Ol (au point' b'), consommant du grenat et convertissant l'olivine en Opx (COR naissant);
- (3) le spinelle dessiné de l'autre côté d'Opx est censé être une continuation des premiers noyaux;
- (4) la deuxième et plus grande nucléation du spinelle peut se produire à des endroits distincts sur la limite initiale du grain (au point «c»);
- (5) la cellule composite continue de croître par les processus eutectoïdes. Spinelles de différents tons de couleur bleue sont censés être des dérivés de différents noyaux

6.8.2. Origine de la topotaxie et de la nucléation de la cellule

Jusqu'à présent, nous avons considéré une croissance constante de la cellule ou d'une colonie. Le cristal d'Opx contenant les spinelles fibreuses se développe essentiellement dans deux directions à partir de son point d'origine probablement à la jonction de deux entités (c.-à-d., à la limite d'un grain originel entre le grenat et l'olivine) comme indiqué par les points rouges dans la fig. 31. La croissance des spinelles nodulaires est l'extension de la croissance des spinelles fibreuses à leur extrémité. La formation des grains de Cpx est la seule exception. Les grains de Cpx ont une répartition discrète et ne sont pas susceptibles d'être reliés les uns aux autres. Ainsi, la nucléation des Cpx se produit sporadiquement et par intermittence, sur le front de réaction pendant la croissance de la cellule. La nucléation de l'Opx et du spinelle, cependant, est considérée comme ayant lieu une seule fois, à la « nucléation » de la cellule. La relation topotaxique entre le spinelle et l'Opx doit donc être établie dès leur stade de nucléation et la nature originelle de la topotaxie est simplement héritée lors de la croissance ultérieure de la cellule.

Obata dessine ensuite un tableau détaillé de la « nucléation cellulaire » pour la kélyphite dans les péridotites à grenats, et présente une théorie sur l'acquisition de la relation topotaxique selon le scénario présenté par Obata et Ozawa (2011). Supposons qu'une kélyphite commence à se développer à la décompression des roches du manteau dans le champ de stabilité de la péridotite à spinelles. La kélyphitisation commence à la surface des grains originels entre le grenat et l'olivine selon la réaction Eq1. Il est peu probable, cependant, que toutes les phases produits, Opx, Cpx et spinelle, aient leur nucléation simultanée. Compte tenu de la structure du domaine Opx, on en déduit que l'Opx est la première phase à nucléer et que chaque domaine d'Opx se développe à partir d'un seul noyau (fig. 31). La nucléation et la croissance d'Opx en dehors du grenat induiront la nucléation suivante du spinelle d'une manière semblable aux phases eutectoides parce que l'Opx ne peut pas consommer tout l'Al provenant du grenat (par exemple Putnis, 1992). La sursaturation en Al serait donc l'élément déclenchant de la nucléation du spinelle. Une différence, toutefois, par rapport à la nucléation d'un simple eutectoïde, la formation du spinelle requiert la présence de qui participe à la réaction Eq1.

Les matériaux nécessaires à la nucléation du spinelle (selon la réaction Eq15) doivent être libérés par la conversion de l'olivine en Opx (COR) selon la réaction Eq16 et fournis au site par le transfert de Mg^{2+} et Si^{4+} . Puisque le COR-Opx se développe à partir des noyaux communs d'Opx, il est naturel qu'ils soient continus et partagent la même orientation cristallographique, formant même un domaine de cristal unique d'Opx encore plus grand (fig. 32). Étant donné que la nucléation du spinelle se produit très probablement à la surface de l'Opx (en raison de la grande énergie d'activation présumée pour la nucléation due à une énergie de surface élevée, c'est-à-dire une nucléation hétérogène), il est probable que l'orientation cristallographique du spinelle suive celle de l'Opx, ce qui entraîne une relation topotaxique entre ces deux phases. L'énergie d'activation pour la nucléation d'une telle colonne vertébrale est considérée comme très élevée en raison de la nature couplée des réactions par l'intermédiaire de l'échange par diffusion d'éléments entre les deux emplacements. Une fois que la nucléation s'est produite, l'association Opx-spinel se développe simplement tel un eutectoïde, remplaçant le grenat, et maintenant la relation topotaxique initialement établie au site de nucléation. L'absence de relation topotaxique observée dans les échantillons de basse température tels que les échantillons norvégiens (Obata et Ozawa, 2011) suggère que l'établissement initial d'une telle relation topotaxique pourrait ne pas se produire pour certains grenats, dans certaines circonstances.

Le nombre de nuclei formés lors de la transformation peut être lié au taux de nucléation (c.-à-d. au nombre de nuclei générés par unité de temps), qui doit être fonction du degré de sursaturation (c.-à-d. au-delà de l'équilibre). Ceci est illustré de façon schématique à la fig. 32. Théoriquement, le taux de nucléation devrait être nul à l'équilibre où la force motrice de la réaction est nulle et devrait augmenter avec le degré de sursaturation.

La symplectite pyroxène-spinelle de la péridotite horoman, qui se compose typiquement d'un seul domaine d'Opx, est donc considérée comme un cas particulier de kélyphite, où le taux de nucléation est si faible qu'un seul noyau se forme par grain de grenat. En raison de l'environnement avec une température relativement élevée pour la péridotite horoman (>950 °C, Ozawa et Takahashi, 1995; Ozawa, 2004), la réaction a probablement eu lieu près de la limite de transition grenat-spinelle, sans beaucoup de retard et, par conséquent, avec un degré minimum de supersaturation.

La taille des grains (ou espacement des lamelles de spinelle et de pyroxène) est probablement principalement régie par la diffusion des cations le long du front de réaction (c.-à-d., limite de grain de grenat), qui est normale à la structure de lamelles. À des températures plus élevées, des éléments diffusent plus rapidement et, par conséquent, une symplectite à grains plus grossiers en résulterait. L'ordre décroissant des symplectites (ou kélyphite) des grains les plus gros au moins gros est, Horoman, tchèque (Mohelno), puis la Norvège, ce qui correspond à l'ordre décroissant des températures de transformation présumées (Obata et Ozawa, 2011).

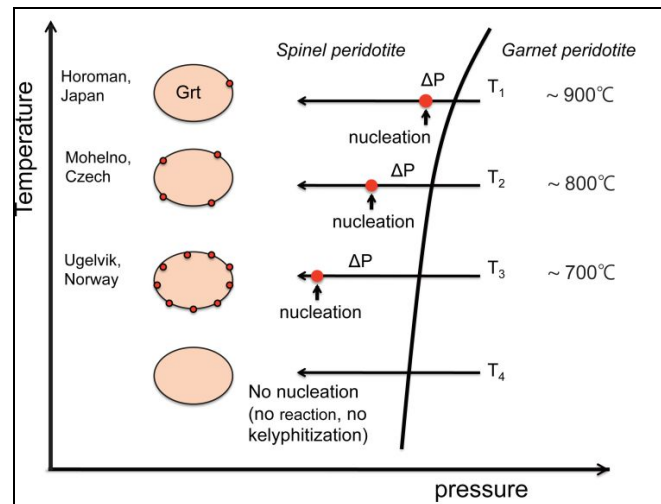


Figure 32 : Kélyphite : Image schématique illustrant dans un espace PT les relations entre les taux de nucléation,

les relations topotaxiques et le degré de sursaturation lors de la décompression, qui peut être liée à la température de transformation.

La nucléation est retardée à des températures plus basses, produisant ainsi plus de noyaux des cellules ayant une topotaxie désordonnée.

Lorsque la température est trop faible, la réaction de kelyphitisation ne se produira pas

Dans l'échantillon tchèque (Mohelno) comme dans l'échantillon d'Horoman, la même relation topotaxique existe pour tous les noyaux cellulaires au stade de la nucléation. L'échantillon norvégien, quant à lui, s'est transformé sous une température de transformation relativement basse (740-760 °C, Obata et Ozawa, 2011), et donc à cause d'une cinétique de diffusion plus lente, la nucléation a dû être retardée, et le niveau de sursaturation très conséquente. Avec des valeurs aussi élevées de sursaturation, lorsque la nucléation s'est enclenchée, elle a été si rapide qu'une multitude de nucléi de spinelle se sont formés et n'ont ainsi pas pu acquérir des relations topotaxiques avec leurs hôtes pyroxénétiques.

La structure du sous-domaine de spinelle observée dans la cellule norvégienne de kélyphite (Opx) (Fig. 21b) indique que la nucléation multiple du spinelle s'est probablement produite dans une cellule simple d'Opx en croissance (fig. 31).

Il est souligné ici que la structure interne de la cellule est créée uniquement au front de réaction et est instantanément figé dès que le front de réaction s'est avancé, sauf pour la croissance des spinelles nodulaires. De même, la formation de plages de Cpx ne se produit également qu'au front de réaction (bien que ne figurant pas sur la fig. 31). Ces Cpx semblent toujours gagner des relations topotaxiques avec l'Opx hôte à chaque nucléation. Cependant, si les roches sont maintenues à des températures suffisamment élevées pendant une période suffisamment longue, le grossissement peut se produire dans les kélyphites comme on l'observe dans la symplectite pyroxène-spinelle de la péridotite horoman (Obata et al., 2007). L'intercroissance vermimiculaire grossière de pyroxènes et de spinelles observée dans certaines xénolithes de péridotites à spinelles (Marcier et Nicolas, 1975; Smith, 1977) peut être un produit final de tels processus de recristallisation à des températures élevées (Godard et Martin, 2000). Un tel schéma présenté ci-dessus peut créer une nouvelle méthode d'étudier et de comprendre la variabilité des textures et les relations topotaxiques par rapport aux environnements géodynamiques des roches hôtes.

6.9 Sommaire des conclusion

Les conclusions importantes tirées de l'étude de la kélyphite de type 1 peuvent être résumées comme suit :

- 1- Un ensemble de kélyphites peut être considéré comme une « colonie » composée de multiples « cellules » tubulaires. Chaque cellule a sa structure interne propre et sa croissance intervient d'un côté au détriment du grenat, et de l'autre en consommant de l'olivine, via les flux de matière intracellulaires. La structure interne de la cellule est créée sur le front de la réaction et est immédiatement figé dans le temps, exceptée la croissance des spinelles nodulaires.

- 2- La loi de la normalité est proposée pour la linéation du spinelle. Elle serait due aux contraintes non hydrostatiques générées au front de réaction par une augmentation du volume.
- 3- La relation topotaxique peut ou ne peut pas être acquise au stade de la nucléation des cellules et la nature de la topotaxie est définie pendant la croissance ultérieure des cellules.
- 4- Le degré de perfection de la topotaxie semble être lié à la température de transformation, et donc lié aux environnements géodynamiques tels que les chemins PT ou la vitesse d'exhumation des roches hôtes.

Il a été démontré que différentes variétés de kélyphites et de symplectites, de systèmes minéralogiquement et chimiquement différents, peuvent être reliées par une opération mathématique appelée substitution et transformation, gérée par le principe de « correspondance » ; une telle méthode peut ouvrir une nouvelle façon de comprendre les diversités naturelles des textures de réactions métamorphiques d'une manière plus unifiée.

	(1)		(2)		(3)		(4)	
	Grt	Kely	Grt**	Kely**	Grt	Kely	Grt	Kely
SiO ₂	42.8	41.4	42.1	37.6	42.4	39.9	41.5	41.3
TiO ₂	0.0	0.0	0.7	0.6	0.1	0.0	0.1	0.0
Al ₂ O ₃	21.1	18.4	21.5	17.8	23.1	20.7	23.6	21.1
Cr ₂ O ₃	4.0	2.6	1.7	1.7	1.3	1.3	1.0	1.1
FeO*	8.2	6.0	8.5	9.0	9.3	7.4	11.0	7.2
MnO	0.4	0.2	0.3	0.2	0.4	0.1	0.6	0.2
MgO	20.7	29.0	20.7	28.2	19.1	27.0	18.1	26.7
NiO	0.0	0.1	n.d.	n.d.	0.0	0.0	0.0	0.0
CaO	3.7	3.5	4.3	4.0	5.7	2.6	5.2	3.0
Na ₂ O	0.0	0.0	n.d.	n.d.	0.0	0.1	0.0	0.3
Total	100.9	101.1	100.0	99.1	101.4	99.0	100.9	100.9

Table 2 : Kélyphite : Comparaison de compositions volumiques

Entre kélyphytes, et leur grenat originel dans plusieurs péridotites crustales à grenats

Grt, garnet; Kely, kélyphite. ** obtenues par analyses chimiques humides, les autres analyses des kélyphites ont été obtenues à partir de calculs d'analyses modales et d'analyses à la microsonde.

Tout le fer est considéré comme FeO.

(1) Ugelvik, Norvège, Obata et Spengler, non publiés; (2) Sklené, Bohême tchèque, Fiala (1966); (3), (4) Ultental, Italie, Godard et Martin (2000).

Notez qu'il y a une diminution significative de Al₂O₃ et augmentation de MgO lors de la kélyphitisation du grenat quel que soit l'échantillon.