

TD 1

La cristallisation fractionnée

Exercice 1 – Cristallisation dans un diagramme binaire avec eutectique :

On suit la cristallisation lors du refroidissement d'un mélange initial représenté par la composition L_0 (20 % de constituant quartz – 80 % de constituant feldspath alcalin - albite) (figure 1).

Lorsque le liquide atteint le liquidus à la température T_0 , des cristaux de feldspath alcalin se forment, donnant une phase solide de composition S_A . Le liquide évolue vers des températures plus basses en suivant le liquidus. Les cristaux d'albite continuent à se former. Pour chaque température, la proportion de solide est donnée par la règle des leviers et correspond à la proportion du segment ou bras de levier opposé par rapport au segment total. Le pourcentage de solide S_A augmente donc jusqu'à la température T_E . À la température de l'eutectique T_E se produit la cristallisation conjointe du quartz et du feldspath alcalin. Celle-ci s'effectue à partir de la fraction de liquide résiduel et dans les proportions de l'eutectique. La texture susceptible d'être obtenue dans cette évolution est celle schématisée en (1) : les premiers cristaux apparus se développent en phénocristaux alors que la seconde phase cristallise plus tardivement à l'eutectique sous des formes plus xénomorphes. Une évolution symétrique figurée en (2) pourrait être observée avec un liquide initial de composition 20 % de constituant feldspath alcalin et 80 % de constituant quartz. Dans le cas d'une cristallisation à l'équilibre, la composition du mélange solide obtenu est identique à celle du liquide initial.

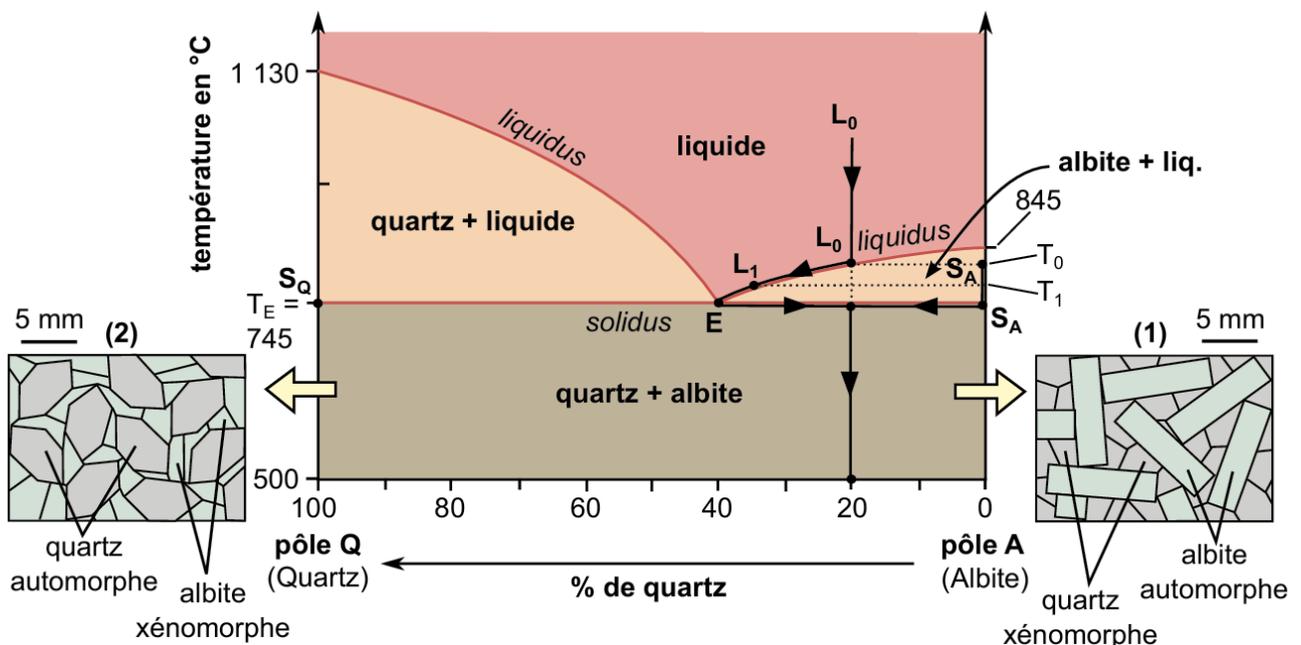


Figure 1: Diagramme de phases du système quartz-albite et cristallisations associées (1) et (2).

Des textures particulières (dites textures symplectiques) peuvent parfois s'observer à l'image de celle photographiée ci-dessous (figure 2).

Outre des cristaux de quartz précoce, on observe ici des plages de quartz et de feldspath intimement associées. Les plages de chaque minéral s'éteignent en même temps en LPA et se rattachent à un même cristal. L'interpénétration des plages correspond donc à deux cristaux lacuneux étroitement imbriqués, l'un de quartz, l'autre de feldspath.

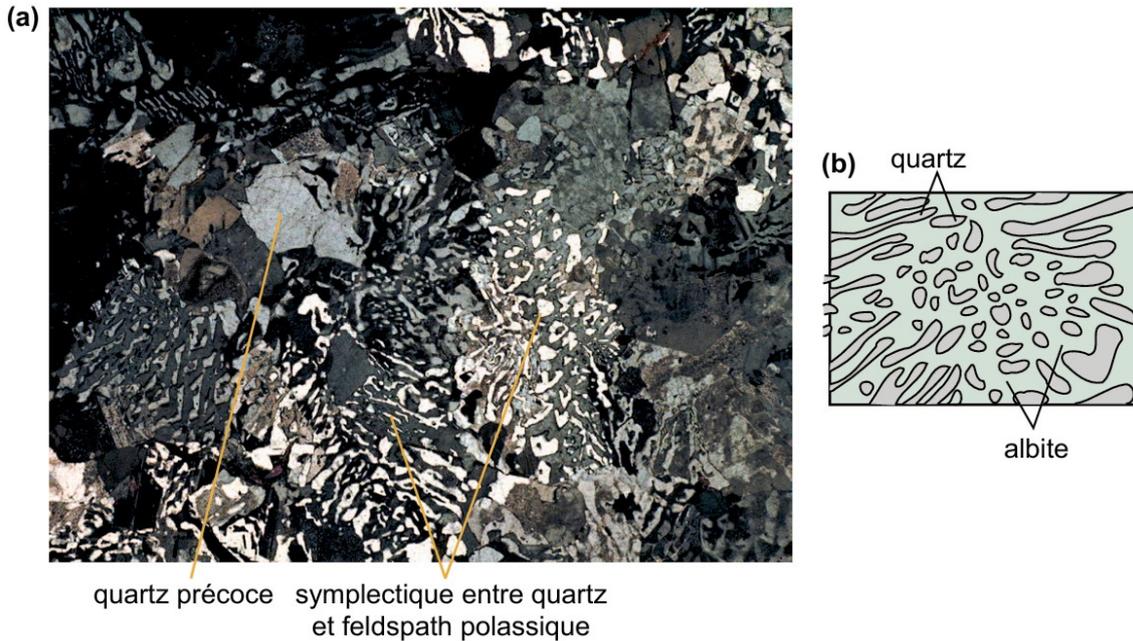


Figure 2: Lame mince dans un granite en LPA **(a)** et représentation schématique d'une structure symplectique **(b)**.

1- Indiquez quelles seraient les proportions et les compositions des phases solide et liquide à la température T_1 .

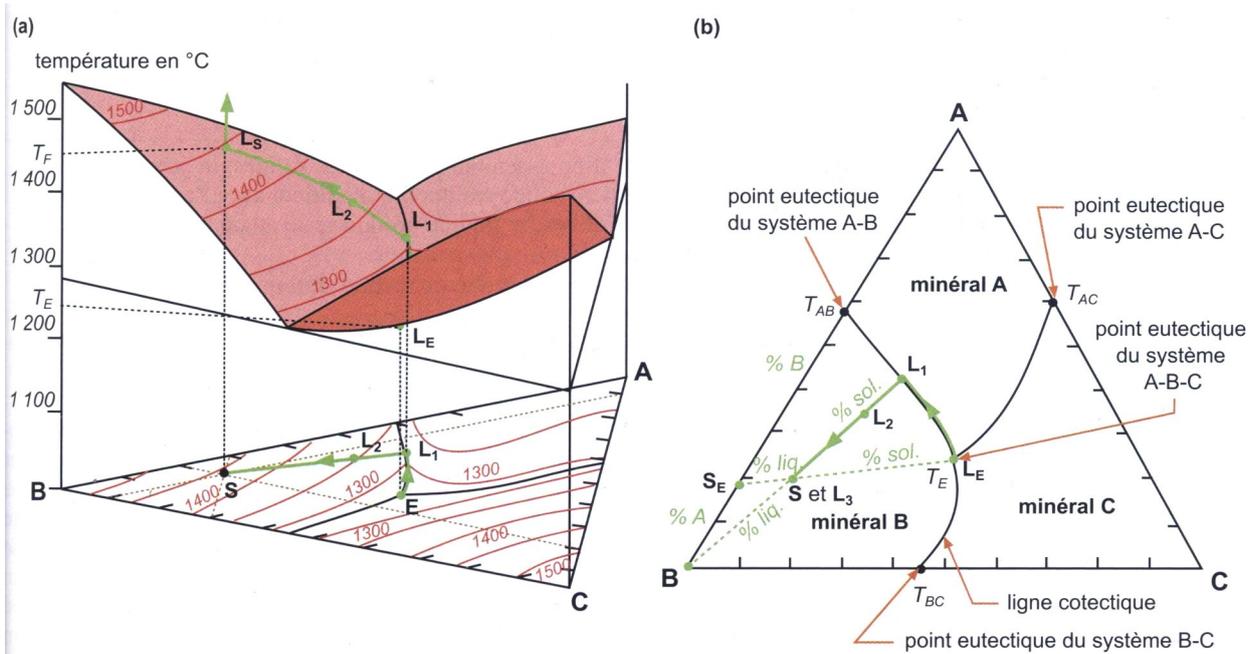
2- Utilisez le diagramme de phases pour indiquer l'origine du quartz précoce de la figure 2 puis celle de la structure symplectique et donnez la composition du liquide qui a donné naissance à celle-ci.

Cours 1 - Les diagrammes ternaires :

Un diagramme ternaire avec eutectique prend en compte 3 phases pures et résulte de l'accolement de 3 diagrammes binaires avec eutectique. Il est établi pour une pression déterminée, les axes verticaux traduisant les températures.

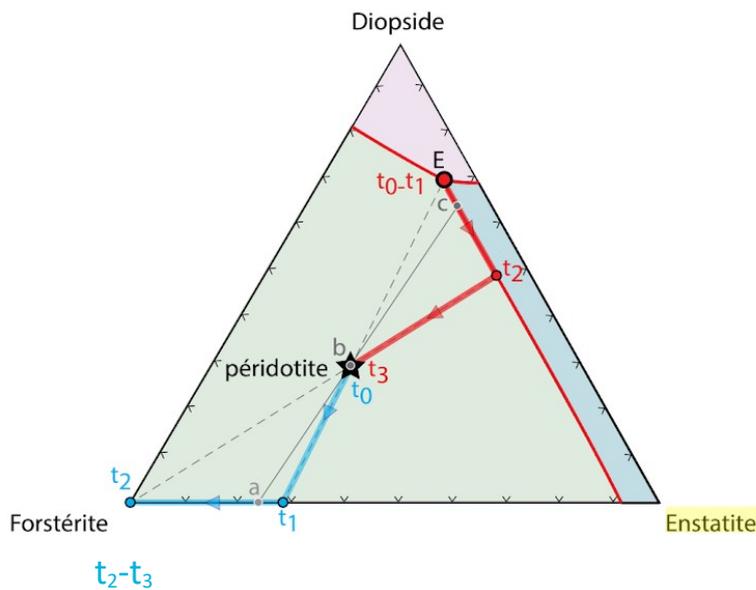
Il est obtenu par projection de la surface des liquidus et le triangle peut porter l'indication des isothermes, à la manière des courbes de niveau sur la projection d'une surface topographique. Les formes des isothermes dessinent des vallées thermiques, constituant des lignes cotectiques. Celles-ci séparent 3 champs dans lesquelles le liquide coexiste avec chacune des phases pures.

Ces vallées convergent vers le point eutectique (appelé puits thermique du système) qui marque la température la plus basse à laquelle peut s'observer un liquide.



Un exemple de diagramme ternaire en 3D et sa projection en plan.
 Exemple de fusion d'un solide de composition S (l'eutectique T_E du système ternaire est de 1 245 °C ; les températures des eutectiques des systèmes binaires A-C (T_{AC}) et B-C (T_{BC}) sont proches l'une de l'autre, juste inférieures à 1 300 °C, l'eutectique du système binaire A-B (T_{AB}) a une température voisine de 1 350 °C).

Exemple : diagramme de phase diopside – enstatite – forsterite (pression = 20 kbar)



Soit un péridotite solide de composition b, que l'on fait fondre. Lorsque le système atteint la température de l'eutectique E, un premier liquide se forme, par fusion simultanée des 3 pôles purs (t_0 à t_1).
 Lorsque le diopside, élément minoritaire du système est épuisé, la composition du liquide produit change : le solide résiduel ne contient plus que de l'enstatite (minoritaire) et de la forstérite, sa fusion entraîne donc un enrichissement du liquide en ces deux éléments (t_1 à t_2)
 Lorsque l'enstatite du solide résiduel est épuisée (t_1), le liquide produit s'enrichit en forstérite, dernier élément composant le solide résiduel, jusqu'à atteindre la composition de la péridotite de départ (t_3).

est donc discontinue avec trois compositions, celle de l'eutectique ternaire, celle d'un eutectique binaire, et celle du constituant pur majoritaire.

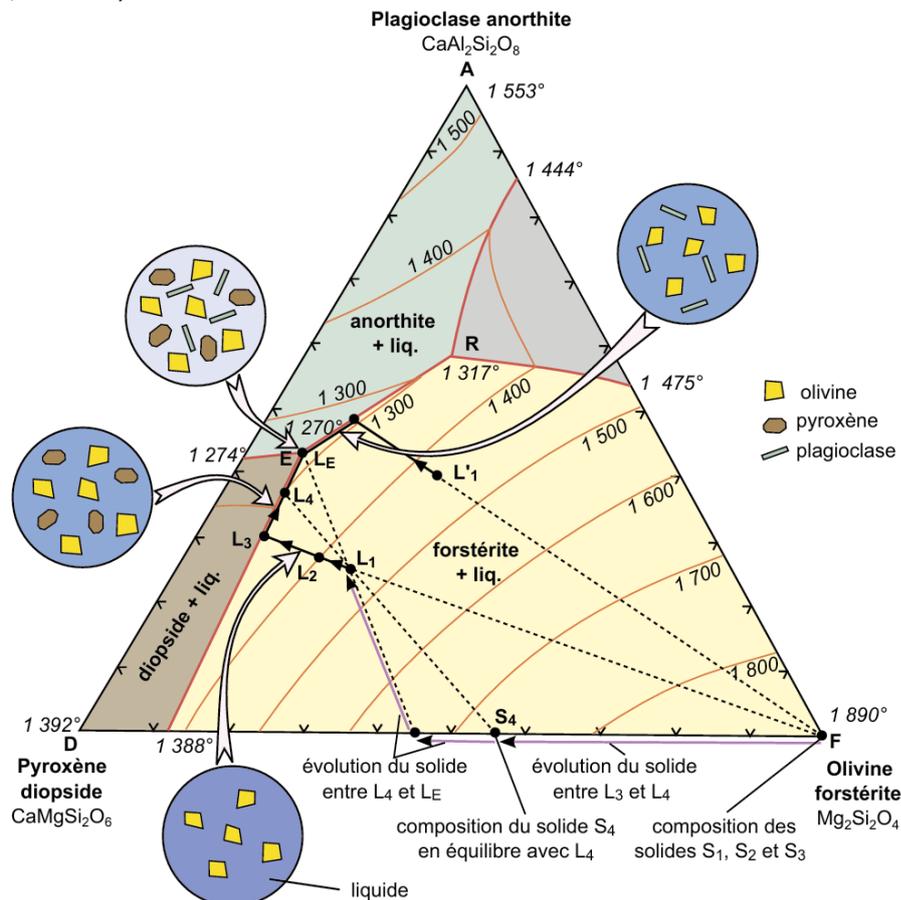
Exercice 2 : Cristallisation dans un diagramme ternaire :

Soit un liquide de composition L_1 (forstérite 25 %; anorthite 25 %; diopside 50%) en cours de refroidissement. Les premiers cristaux apparaissent à une température de l'ordre de 1450°C : ce sont des cristaux d'olivine (solide S_1 dont la composition se situe au pôle F). Le liquide s'appauvrit alors en constituant magnésien et évolue en direction de la ligne cotectique selon une droite F- L_1 (qui exprime un appauvrissement en magnésium avec conservation des proportions relatives des autres éléments). Lors de cette évolution, la portion de liquide et de solide peut être estimée par la règle des leviers. Ainsi, à la température correspondant à la composition L_2 , (1400°C), les proportions de solide et de liquide sont respectivement de : $L_1-L_2 / F-L_2$ et $L_1-F / F-L_2$.

La composition du solide S_2 , formé uniquement d'olivine est toujours au pôle F. Le liquide atteint en L_3 la température de la ligne cotectique où débute la cristallisation du diopside. L'évolution se fait alors selon la vallée thermique en direction du point E. Au cours de cette évolution, le solide est constitué d'olivine et de diopside avec une composition qui évolue selon la ligne F-D.

Le liquide atteint enfin l'eutectique avec une composition L_E : l'anorthite cristallise. La composition du solide quitte alors la ligne F-D jusqu'à retrouver la composition du liquide initial.

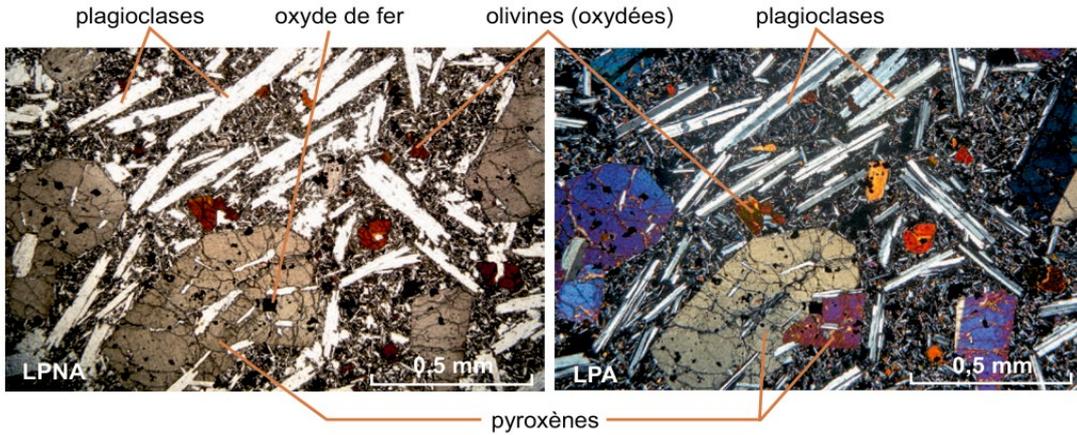
On obtient finalement un solide constitué des phases anorthite – diopside et olivine dans les proportions initiales (F=25 %; A=25 %; D=50%).



1- L₄ est un liquide situé entre L₃ et L_E. Relevez sur le diagramme quelle est la composition du solide en équilibre L₄. Quelles sont alors les proportions de solide et de liquide ?

2- Indiquez quel serait l'ordre de cristallisation pour un liquide initial de composition L'1.

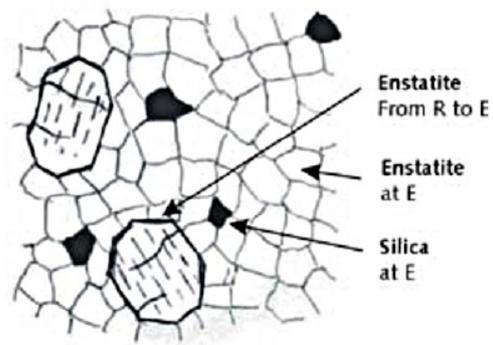
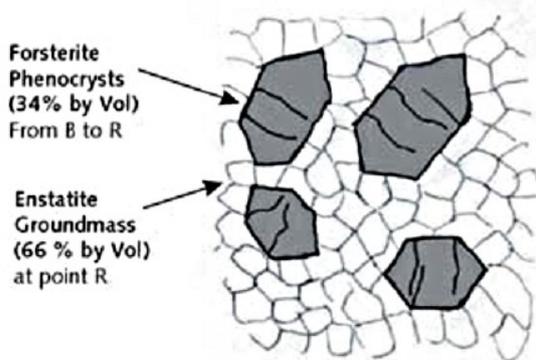
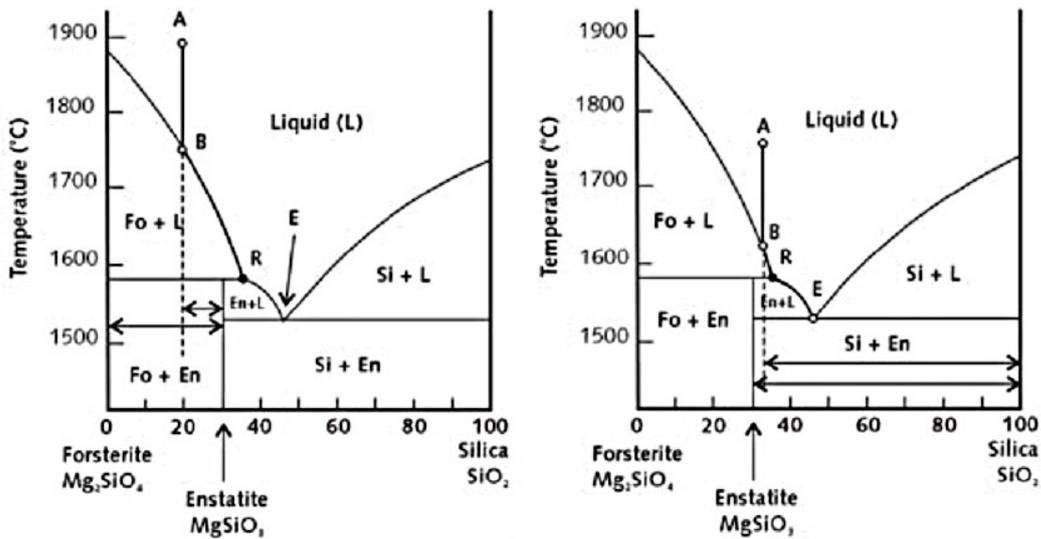
3- Dans quel champ se situerait le liquide initial du basalte ci dessous :



Cours 2 – Les diagrammes binaires avec péritectique :

De nombreux systèmes géologiques comportent un point réactionnel sur le liquidus, appelé point péritectique, où une phase solide réagit avec le liquide résiduel de manière à former une autre phase solide.

C'est le cas du système forstérite / silice, qui présente un point péritectique sur le liquidus de la forstérite, au niveau duquel la forstérite réagit avec le liquide résiduel pour former de l'enstatite.



On peut remarquer que pour les domaines de températures supérieures au péritectique, l'assemblage stable est Forstérite + liquide, alors qu'en dessous, c'est Enstatite + liquide.

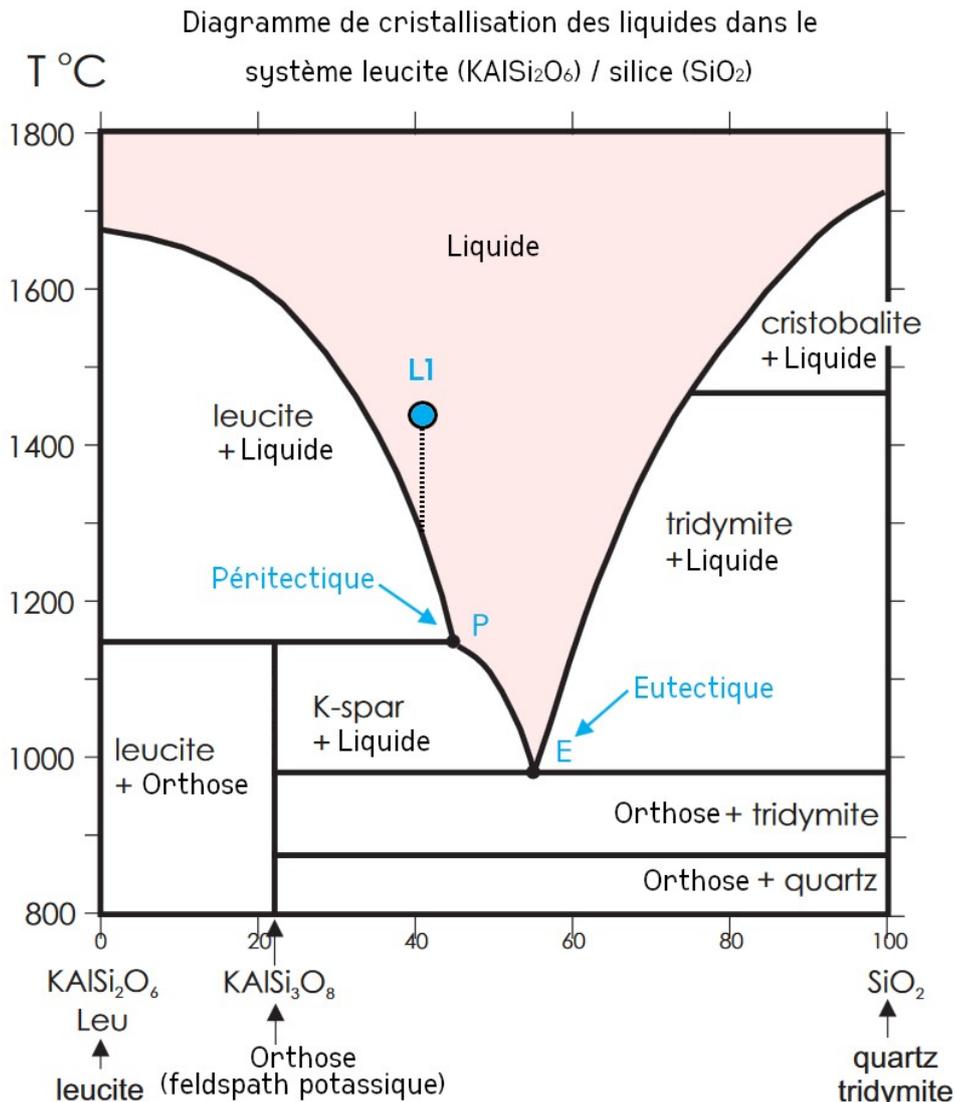
Si l'on fait cristalliser un mélange en fusion A, la forstérite va commencer à cristalliser au point B, et la composition du mélange évoluera vers le point R (péritectique). Au niveau de ce point, la forstérite réagit avec la silice contenue dans le liquide résiduel, pour donner de l'enstatite selon la réaction suivante :



Dans des conditions idéales, le système restera au point réactionnel R tant que toute la forstérite ou tout le liquide n'ait été consommé dans la réaction. Si le mélange originel contient moins de silice que d'enstatite (courbe de gauche), le liquide sera consommé avant la forstérite. Le magma aura donc totalement cristallisé au point R, et la roche finale ne sera composée que de forstérite. Il est à noter que ce magma n'atteindra jamais l'eutectique.

Si la composition du magma originel a une composition comprise entre l'enstatite et la silice (courbe de droite), il restera du liquide au point R. Dans ce cas, toute la forstérite réagira et donnera de l'enstatite + liquide. Ce magma résiduel continue de refroidir le long du liquidus entre R et E, le mélange eutectique donnant alors de l'enstatite et de la silice jusqu'à cristallisation complète du magma.

Exercice 3 : le système Leucite / quartz



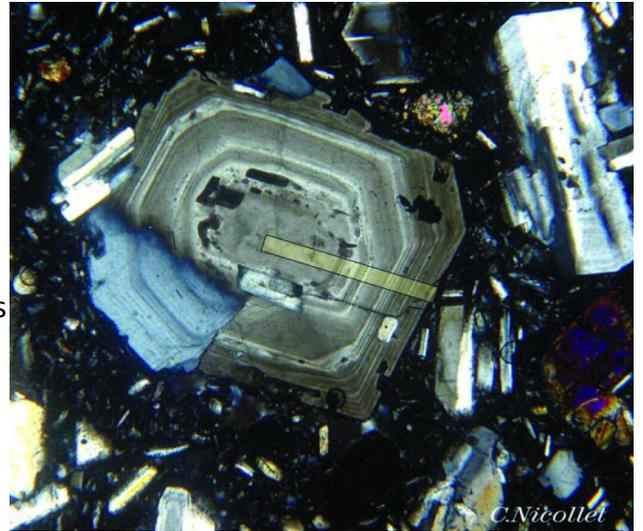
Commentez ce diagramme, et expliquez pourquoi quartz et feldspathoïdes sont exclusifs l'un de l'autre au sein des roches ignées.

Exercice 4 : Interactions solide / liquide lors de la cristallisation :

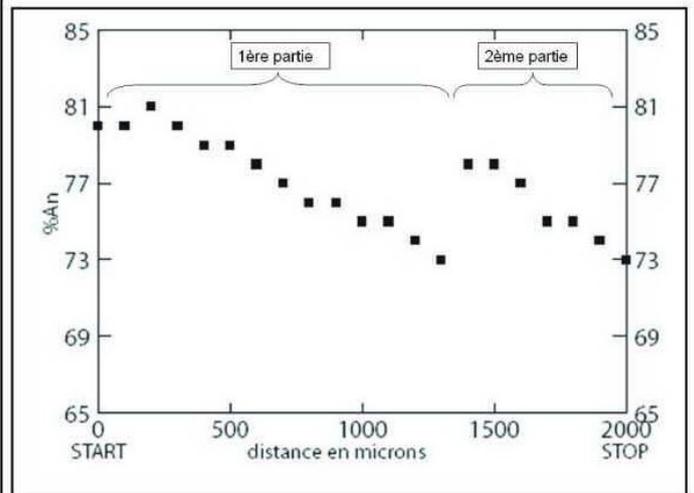
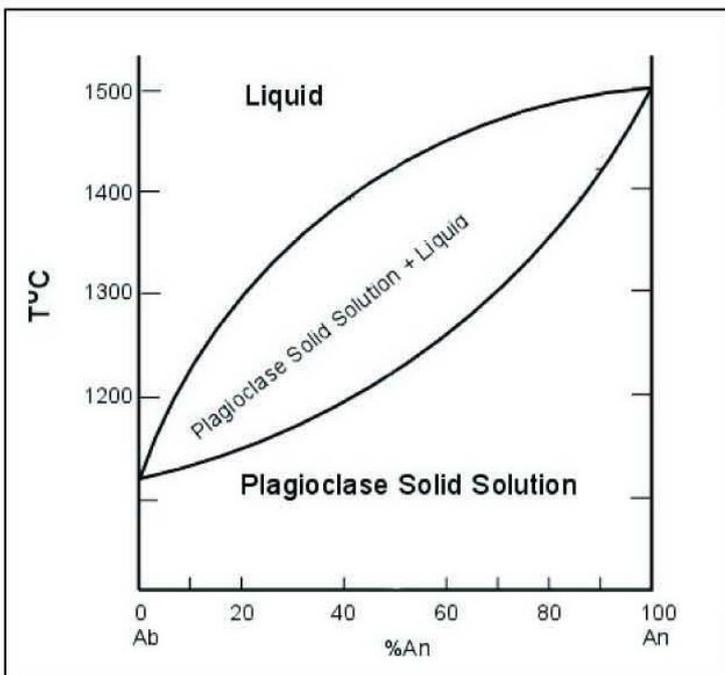
On se propose d'étudier les modalités de croissance des minéraux au travers de l'analyse de leurs diagrammes de phases. Nous allons nous intéresser au minéral photographié ci-dessous en LPA.

1- Donnez le nom de ce minéral.

2- Comment se nomment les stries concentriques visibles dans ce minéral ?



Une étude chimique faite par microsonde ionique le long du profil représenté sur la photo, donne les résultats suivants :



3- Expliquez la première partie des résultats grâce au diagramme de phase. Vous établirez une corrélation entre les mesures faites et l'observation en lame mince.

- 4-** Précisez la composition du liquide de départ, en supposant que la première analyse corresponde à la nucléation initiale.
- 5-** Précisez la température à laquelle le dernier cristal de ce système se formera.
- 6-** Quelles sont les proportions relatives de liquide et de solide pour une température $T_1=1300^{\circ}\text{C}$?
- 7-** Sachant que la roche dont fait partie ce cristal est issue d'une chambre magmatique, expliquez la transition entre les deux parties de l'analyse.
- 8-** Comment expliquer la partie bleutée du cristal ?