

L'ANDALOUSITE ET SES PHASES DE TRANSFORMATION DANS LA RÉGION DE VIELSALM (*)

par K. THEUNISSEN (**)

(3 figures, 1 tableau et 2 planches dans le texte)

RÉSUMÉ

Les phyllades violacés et le coticule (roche à spessartine-quartz-séricite) du Salmien (Ordovicien) de Vielsalm contiennent des porphyroblastes d'andalousite qui ont été transformés successivement en kaolinite et en séricite. L'andalousite d'un filon de quartz à andalousite, associé à ces roches, montre une kaolinisation et une pyrophyllitisation successives. Ces transformations sont vraisemblablement le résultat d'une rétro-morphose hydrothermale tardive, suivie par une acidification responsable de la pyrophyllitisation et d'une remobilisation de la potasse, responsable de la séricitisation.

ABSTRACT

Andalusite porphyroblasts in haematitic slates and in spessartine-sericite-quartz rocks (coticule) of Ordovician age, were transformed successively into kaolinite and sericite. Associated andalusite in quartz veins was transformed successively into kaolinite and pyrophyllite. The kaolinization is probably due to a late retromorphic hydrothermal phase, which was followed by acidification causing pyrophyllitization or by K-remobilization, giving rise to sericite.

LE PROBLÈME

La présence d'andalousite dans certains lits du niveau à coticule du Salmien de la partie méridionale du massif de Stavelot, a été soupçonnée par M. LOHEST (1911). Quoique A. DUMONT (1848) ait déjà observé ces « grains », il a fallu longtemps pour que le minéral soit déterminé (J. ANTEN, 1924). L'historique de cette question a été traité par F. CORIN (1963-1964) aux notes duquel nous renvoyons le lecteur.

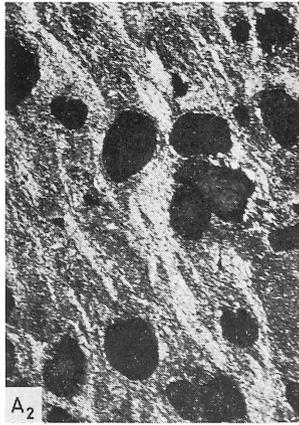
Rappelons que ces grains d'andalousite forment le noyau de taches, dites « Knoten » ou « Spots », de moins d'un demi millimètre de diamètre. Ces noyaux d'andalousite sont entourés dans ces spots (type A) par une auréole souvent optiquement isotrope, parfois légèrement biréfringente, que J. ANTEN (1923) a désignée sous le nom de « Lohestite » (Planche I, fig. A1-A2, Pl. II, fig. E1-E2, F, G, H). Cette substance, qui constitue également l'entièreté de certains spots (type B) (Pl. I, fig. A1-A2, B1-B2), n'avait pu être déterminée jusqu'à présent; elle contient en effet des inclusions d'autres minéraux qui en dissimulent les caractères optiques.

(*) Communication présentée durant la séance du 3 mars 1970. Manuscrit déposé le 24 avril 1970.

(**) Laboratoire de Pétrographie, Université de Louvain, 6, St.-Michielstraat, 3000 Louvain.



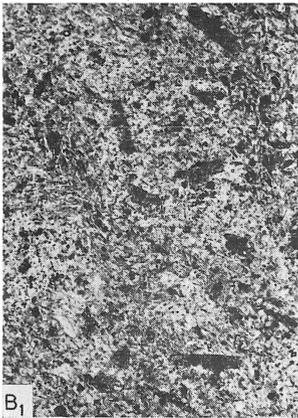
A₁



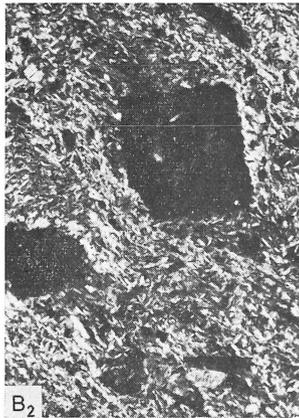
A₂



D₁



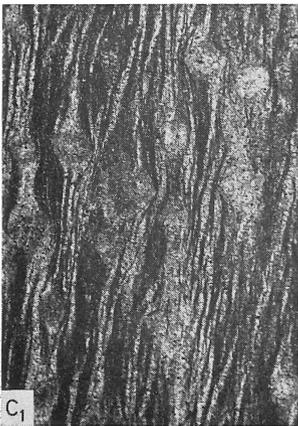
B₁



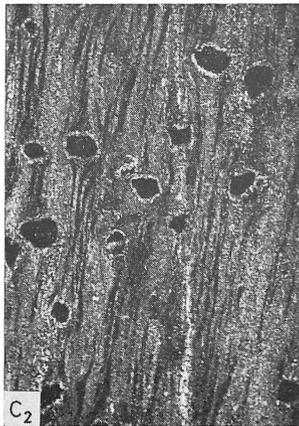
B₂



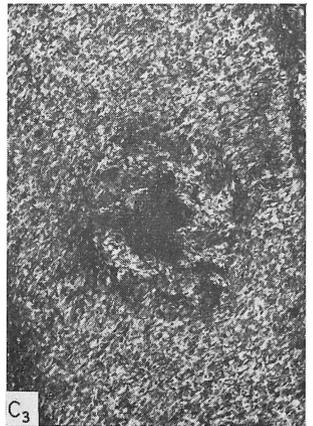
D₂



C₁



C₂



C₃

PLANCHE I

A — Spots du type A, à noyau d'andalousite et du type B.

Coticule — Veine « Grosse Blanche » de Vielsalm, carrière de M. OFFERGELD.

Champ de 0,37 mm sur 0,46 mm.

A1 : en lumière naturelle,

A2 : entre nicols croisés.

Le lame contient des spots du type A, à noyau d'andalousite et auréole de kaolinite, et du type B, constitués uniquement de kaolinite. L'andalousite se reconnaît, en lumière naturelle à son relief accusé, entre nicols croisés à sa teinte d'interférence gris-foncé, sauf pour les grains qui sont en position d'extinction. (On comparera le spot du type A, situé dans le quart gauche supérieur aux photos de détail E1 et E2 de la planche 2.)

Les spots du type B, indistincts en lumière naturelle, sont reconnaissables entre nicols croisés par leur isotropie (ne pas les confondre avec les grains d'andalousite éteints).

La pâte phylliteuse, quartzo-séricitique, manifeste une schistosité (crenulation cleavage) qui contourne les spots, et qui leur est donc postérieure. La kaolinite non affectée par cette schistosité lui est postérieure.

B — Spots du type B, associés au chloritoïde.

Phyllade violacé prélevé dans la tranchée du chemin de fer à Salm-Château, dans la zone de transition entre le Sm2b et le Sm2c. Champ de 0,60 mm sur 0,82 mm.

B1 : en lumière naturelle,

B2 : entre nicols croisés.

Le contour des deux spots bien visible par leur quasi-isotropie entre nicols croisés, est très difficile à reconnaître en lumière naturelle.

Deux baguettes de chloritoïde sont clairement reconnaissables en haut et en bas de la photo. Trois plages finement pigmentées à l'intérieur du plus grand des deux spots, bien visibles en lumière naturelle, représentent vraisemblablement des fantômes de chloritoïde.

La pâte de la roche est composée de quartz, de séricite, de chlorite et d'un pigment diffus ou en paillettes; on y observe aussi quelques spessartines minuscules.

C 1-2 — Spots du type C, à noyau de kaolinite et auréole de séricite. Coticule —

Veine « Dados » de la carrière Le Houlpaix, à Regné. Champ de 6 mm sur 8,2 mm.

C1 : en lumière naturelle,

C2 : entre nicols croisés.

La seconde schistosité de la roche est très bien marquée par des bandes foncées en lumière naturelle, qui correspondent à des phyllites réglées parallèlement aux grands côtés de la photo. Les nicols sont croisés à 45° de cette direction, de telle sorte que ces bandes phylliteuses sont claires entre nicols croisés.

On remarquera la distribution générale des spots aussi bien en lumière naturelle, par déviation de la schistosité, qu'entre nicols croisés, où les spots isotropes sont entourés d'une couronne continue de séricite non-orientée. Les spots sont nécessairement antérieurs à la schistosité qui dévie autour d'eux. La kaolinite des spots et leur auréole de séricite sont d'autre part postérieures à cette schistosité et donc néogènes.

C 3 — Spot du type C à large auréole de séricite.

Coticule — Veine « Dressante » des carrières de Regné.

Champ de 0,60 mm sur 0,82 mm. Nicols croisés.

Le spot représente un stade plus évolué de la transformation de l'andalousite. Le noyau de kaolinite isotrope est réduit à 0,1 mm de diamètre. Autour de ce spot on distingue d'innombrables grains très fins de spessartine, ainsi que les séricites de la pâte, orientées selon la première schistosité, et déviées par la seconde schistosité (dans le coin droit supérieur). La séricite néogène de l'auréole du spot ne montre pas d'orientation préférentielle; elle est donc postérieure au développement de l'une et de l'autre schistosité.

D — Spots du type D, composés entièrement de séricite néogène.

Coticule — Veine « Premier Double de la Grise » des carrières de Regné.

Nous décrivons dans cette note les critères qui nous ont permis de la rapporter à un minéral du groupe de la kaolinite.

Nos recherches nous ont permis de rapprocher de ces deux types de spots (A et B), un troisième type (C) (Planche I, fig. C1-C2-C3), mentionné par certains auteurs (J. GOSSELET, 1888; G. SPAETH, 1962) et dans lequel la kaolinite est frangée de séricite, ainsi qu'un quatrième type (D) (Planche I, fig. D1-D2), constitué entièrement de séricite.

Ces quatre types de spots nous paraissent former une série évolutive à partir de porphyroblastes d'andalousite :

type A — spots à noyau d'andalousite et à auréole de kaolinite,

type B — spots de kaolinite,

type C — spots à noyau de kaolinite et à auréole de séricite,

type D — spots de séricite.

Par contre, nous n'examinerons pas dans cette étude divers types de spots qui ne sont apparemment pas liés génétiquement aux précédents, même si comme le type D, ils sont composés uniquement de séricite.

L'andalousite se rencontre également dans des filons de quartz à andalousite, signalés entre autres par J. ANTEN (1912) et F. CORIN (1963). Comme nous l'indiquerons plus loin, elle y est associée à un minéral du type de la « Lohestite », que nous avons pu identifier comme étant de la kaolinite, ainsi qu'à de la pyrophyllite, de la séricite et de la chlorite.

ÉCHANTILLONNAGE

Quoique sa position stratigraphique ait été longtemps problématique, le niveau à coticule est à présent bien localisé dans l'échelle stratigraphique du Salmien métamorphique. Il s'agit du niveau Sm2b de F. GEUKENS (1966), qui correspond d'ailleurs approximativement au niveau C de J. ANTEN (1913).

Ce niveau est constitué de phyllades de teinte violacée, parfois très foncée avec quelques bandes claires, de teinte blanc-jaunâtre, jaune-vert à jaune-brunâtre, qui

PLANCHE I (suite)

D1 : champ de 6 mm sur 8,2 mm, en lumière naturelle,

D2 : champ de 0,95 mm sur 1,30 cm, entre nicols croisés.

La photo D1 montre de gauche en dessous, à droite en haut, une bande sériciteuse qui correspond à la stratification. La zonation qui se reconnaît en lumière naturelle par l'alternance de bandes claires : quartzo-séricitiques, et sombres : séricito-grenatifères, au relief plus accusé, est la deuxième schistosité, qui contourne les spots.

On identifiera dans le bas de la photo D1 un des spots qui est reproduit à plus grande échelle, entre nicols croisés, dans la photo D2. Les bandes séricito-grenatifères de la deuxième schistosité apparaissent ici en clair, par suite de l'orientation préférentielle des séricites; les bandes quartzo-séricitiques apparaissent en sombre avec des paillettes de séricite, en clair, orientées perpendiculairement à la deuxième schistosité, suivant les plans de la première schistosité.

Le spot est entièrement composé de séricite non orientée, qui est donc postérieure à la seconde schistosité; il dévie cette seconde schistosité et existait donc comme un noyau cohérent lors du développement de celle-ci. L'orientation des rutilés à l'intérieur du spot (non visibles sur la photo) suivant la première schistosité, indique que les spots se sont formés dans une phase intermédiaire entre la première et la seconde schistosité.

forment les « veines de coticule », dont certaines sont exploitées comme pierre à rasoir. Il s'agit d'intercalations sédimentaires.

Ce niveau à coticule (Sm2b) se trouve intercalé entre les phyllades violacés et verts à otréélite (Sm2c) qui le surmontent d'une part, et d'autre part, les quartzo-phyllades et grès quartzitiques rouge-violacé (Sm2a), sur lesquels il repose.

Nous avons pu effectuer un échantillonnage du niveau à coticule d'une façon très détaillée, dans la région de Vielsalm, où la plupart de nos échantillons ont été prélevés dans la galerie N-S à « travers-bancs », de la carrière souterraine de M. OFFERGELD (*).

Dans la région occidentale (Regné, Otré et Bihain), les carrières souterraines de coticule étaient jadis très nombreuses. Ces exploitations, actuellement abandonnées, sont envahies par l'eau qui en rend l'accès impossible. C'est pourquoi nous devons nous contenter des échantillons que divers exploitants ont eu l'amabilité de nous procurer en ajoutant en certains cas la dénomination locale de la veine exploitée, dont ils proviennent. Ceci revient à dire que les échantillons de la région occidentale se limitent à des coticules anciennement exploités, tandis qu'à Vielsalm tout le niveau Sm2b a pour ainsi dire été soumis à l'étude. De ce fait, nous ne pouvons tirer de conclusion quant à la distribution des spots dans les différentes carrières.

Quoique les veines de quartz, recoupant le niveau à coticule soient fréquentes, l'andalousite y est relativement rare et nous n'en avons jamais trouvée en place. Nous avons toutefois eu la bonne fortune d'en trouver un échantillon dans les débris rejetés au terril à proximité de la carrière souterraine de M. OFFERGELD. L'andalousite se distingue du quartz par son éclat plus mat et sa couleur jaune-verdâtre, mais elle est facilement masquée par un enduit de limonite.

LA PÉTROGRAPHIE DES PHYLLADES ET DU COTICULE A « SPOTS »

Nous nous limiterons dans ce travail aux roches qui contiennent au moins un des types de spots définis plus haut. A Vielsalm, il s'agit donc de la grande majorité des phyllades violacés de l'assise Sm2b et de certaines bandes de coticule.

Les spots se retrouvent jusqu'à la limite des deux niveaux Sm2b et Sm2c, où nous avons retrouvé dans la même roche, les derniers spots (du type B) et les premiers porphyroblastes de chloritoïde du niveau Sm2c (Planche I, Photos B1-2). Les roches à chloritoïde de ce niveau Sm2c sont porphyroblastiques et pourraient être également désignées comme « Spotted Slates », mais elles ne rentrent pas dans cette étude.

A part la teneur en hématite, le phyllade rouge et le coticule contiennent les mêmes associations minérales; la composition chimique du phyllade violacé et du coticule ne diffèrent que par leur teneur respective en Fe_2O_3 . On remarquera à ce propos que certaines bandes violacées (p. ex. Veine Lorraine, exploitée jadis au Tier du Mont) sont également exploitées comme « pierre à aiguiser » et sont d'aussi bonne qualité que le coticule.

La pigmentation des phyllades violacés rend toutefois l'étude microscopique plus laborieuse, aussi notre démonstration portera-t-elle surtout sur les bandes claires des « veines de coticule », ou du moins sur celles qui contiennent des spots.

A. Paragenèse

Mise à part les spots, tous les minéraux qui constituent la pâte des roches sur

(*) L'orifice de la carrière est situé en coordonnées Lambert : 107.94N-259.59E.

lesquelles porte cette étude ont une dimension de l'ordre de quelques microns. La pâte est composée d'un très fin feutrage de *séricite*, mélangé au *quartz* également très fin.

La *chlorite* n'est pas perceptible dans la pâte sériciteuse, lorsqu'elle a les mêmes dimensions que la *séricite*. L'analyse chimique de la roche ne montre que très peu de MgO et de FeO, aussi nous supposons que le minéral n'est présent qu'en très faible quantité. Ce n'est qu'exceptionnellement qu'on le rencontre en porphyroblastes.

Dans cette pâte phylliteuse, sont dispersés de très fins grains de *spessartine* en quantité variable suivant la stratification. Ce minéral peut constituer plus de 90 % de la roche. Par suite de la petitesse du grain, le grenat semble souvent anisotrope par superposition avec les phyllites.

Enfin nous devons signaler la présence de très fines aiguilles d'un minéral que nous rapportons au *rutile*.

En dernier lieu, nous avons dans ces roches au moins un des types de *spots* que nous avons signalés plus haut et que nous allons étudier en détail plus loin.

Le phyllade violacé contient en outre un pigment que nous rapportons à l'*hématite*. Celui-ci se présente à l'intérieur des *spots* sous forme de grains très fins, distribués suivant la stratification, qui prennent une teinte rouge brique lorsqu'on insère le condenseur ou parfois en paillettes assez fines pour être translucides et rouges, avec un contour hexagonal typique. Dans la pâte de la roche par contre, l'*hématite* forme le plus souvent des paillettes complètement opaques. L'analyse chimique nous montre que ces phyllades ne diffèrent essentiellement du coticule, que par la teneur en Fe_2O_3 , ce qui confirme l'attribution du pigment à ce minéral.

B. Les Spots

Les *spots*, quel qu'en soit le type, ont toujours des contours plus ou moins polygonaux. Ils contiennent toujours en inclusion les grains subisométriques de *spessartine* et les aiguilles que nous rapportons au *rutile*, identiques à ceux contenus dans la pâte de la roche, quand ceux-ci sont présents dans la pâte de la roche. Dans le phyllade violacé les *spots* contiennent en plus le fin pigment d'*hématite* rouge distribué suivant la stratification originelle, qui est généralement parallèle à la première schistosité de la roche. Cette première schistosité est marquée à l'extérieur des *spots* par l'orientation préférentielle des *séricites* et des fines aiguilles de *rutile*. L'inclusion de *rutile* orienté, dans les *spots*, suggère que ces *spots* sont postérieurs à cette première schistosité. Par contre, la seconde schistosité, suivant laquelle les *séricites* et les *rutiles* sont réorientés, contourne les *spots* et est donc postérieure à ceux-ci. (Planche I, A1-2, C1-2, D1-2).

1. *Spots* du type A. (Pl. I, Fig. A1-2, Pl. II, Fig. E1-2, F, G, H).

Ces *spots* contiennent un noyau d'andalousite, entouré par une auréole de kaolinite.

a) *Andalousite* ;

Les caractères optiques qui permettent de confirmer l'identification de l'andalousite établie par J. ANTEN, sont les suivants :

- incolore, parfois légèrement jaunâtre,
- non pléochroïque,
- relief marqué,

- un bon clivage selon lequel l'extinction est droite,
- teinte d'interférence du gris au blanc de premier ordre, atteignant exceptionnellement le jaune,
- allongement négatif vis-à-vis du seul clivage,
- biaxe négatif à angle $2V$ s'approchant de 90° .

Le contour irrégulier des grains, entourés d'une auréole de kaolinite et pénétrés par ce minéral, n'est pas diagnostique; si, comme nous le pensons, le contour polygonal des spots représente la forme extérieure initiale des porphyroblastes d'andalousite, il faut remarquer que celle-ci ne présente jamais les formes allongées de l'habitus prismatique classique de l'andalousite.

b) *Kaolinite* :

Les nombreuses inclusions de grenat, de rutile et d'hématite contenues dans la kaolinite et sa structure d'agrégat en rendent l'identification par voie optique impossible. Nous mentionnerons toutefois les caractères optiques du minéral dans les spots :

- incolore à légèrement brunâtre ou vert-olive,
- non pléochroïque ou très faiblement pléochroïque,
- relief négatif vis-à-vis du quartz,
- teinte d'interférence très basse, à tel point que le minéral semble généralement isotrope.

Certains grains montrent cependant une faible anisotropie que l'on remarque à très fort grossissement en insérant le condenseur et la lame de gypse (Violet I). Dans certains cas exceptionnels, une anisotropie plus marquée permet de reconnaître une structure d'aspect fibreux (Planche 2, photos F, G, H) avec la même orientation des fibres dans un même spot; dans les rares cas où l'on observe deux spots fibreux au voisinage l'un de l'autre, l'orientation de l'agrégat est différente d'un spot à l'autre. L'insertion du gypse montre un allongement optique variable tantôt positif, tantôt négatif, par plages, ce qui ne s'explique pas si on cherche à reconnaître dans la structure « fibreuse » l'allongement optique positif des feuillettes de la kaolinite; certaines « fibres » seraient perpendiculaires aux feuillettes. Cette dernière interprétation est suggérée par les plages de kaolinite associées à l'andalousite dans la veine de quartz (Planche II, photos J, L) où les « fibres », parfois plus grossières, montrent un dessin rappelant les plages de calcédonite à enroulement décrites par L. CAYEUX (1916). Dans certains cas, on observe que certaines plages montrent une striation perpendiculaire à leur allongement négatif.

Nous avons essayé d'isoler la kaolinite de ces spots afin de les soumettre à l'analyse diffractométrique; il est aisé de comprendre toutefois que, même pour les spots de type B, les diffractogrammes sont rendus ininterprétables par la présence des raies de la séricite. La détermination de la kaolinite dans les spots n'a été possible que grâce à la microsonde.

L'épaisseur de l'auréole de kaolinite varie d'un échantillon à l'autre. L'auréole de kaolinite est parfois très mince, parfois plus épaisse; le type A se rapproche alors du type B. L'épaisseur de l'auréole est généralement constante dans une même lame mince, mais exceptionnellement les deux types peuvent se trouver associés (Planche I, photos A1-2).

La kaolinite pénètre parfois entre diverses plages d'andalousite qui ont toujours la même orientation optique (Planche II, photos E1-2). Lorsqu'exceptionnellement l'orientation optique de deux noyaux d'andalousite est différente, la forme extérieure indique clairement qu'il s'agit de deux spots adjacents (Planche I, photos A1-2).

Les inclusions de spessartine, de rutile et d'hématite sont distribuées dans le spot d'une manière qui est indifférente à la limite entre le noyau d'andalousite et l'auréole de kaolinite.

2. Spots du type B.

Les spots du type B, constitués seulement de kaolinite, avec les mêmes inclusions

PLANCHE II

E — Spots du type A (détail des photos A1-A2 de la planche I).

Champ de 0,09 mm sur 0,14 mm en lumière naturelle (E1) et entre nicols croisés (E2).

Ces photos figurent en détail une partie voisine du centre du champ des photos A1 et A2, sur lesquelles on reconnaît aisément le spot du type A. Le noyau d'andalousite à relief marqué est fissuré en trois plages, qui montrent une orientation optique identique. L'auréole et les fissures dans le noyau sont composées de kaolinite à l'aspect subisotrope.

La première schistosité se manifeste par l'orientation des aiguilles de rutile reconnaissables dans la kaolinite et dans l'andalousite. A l'extérieur du spot les séricites sont déviées par le développement de la seconde schistosité qui n'affecte pas l'auréole kaolinite. Celle-ci n'existait donc pas comme telle au moment du développement de cette schistosité.

F, G, H — Spots du type A montrant une structure microfibreuse dans l'auréole de kaolinite.

F : échantillon de coticule provenant de la tranchée du chemin de fer à Salm-Château. Champ de 0,38 mm sur 0,56 mm, nicols croisés.

G, H : échantillon de phyllade violacé de la carrière de M. OFFERGELD à Vielsalm. Champ de 0,6 mm sur 0,9 mm, nicols croisés.

Le spot de la photo F est un spot qui a été analysé à la microsonde. Les traits blancs correspondent aux profils A-B et C-D de la figure 1, où le même spot est reporté en croquis. On remarquera l'orientation constante des fibres dans toute l'auréole. Les photos G et H montrent également une structure microfibreuse de l'auréole de kaolinite. On remarquera en plus dans le noyau d'andalousite, une structure zonaire, formée par des trainées du pigment hématitique, parallèlement à la stratification originelle.

J, K, L — Filon de quartz à andalousite.

J : champ de 0,95 mm sur 1,43 mm entre nicols croisés.

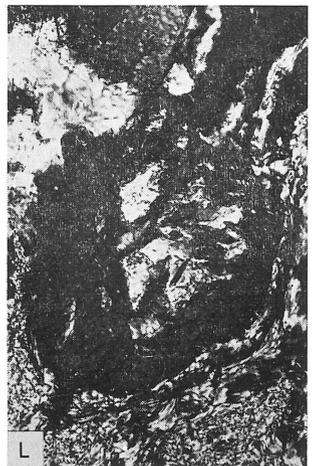
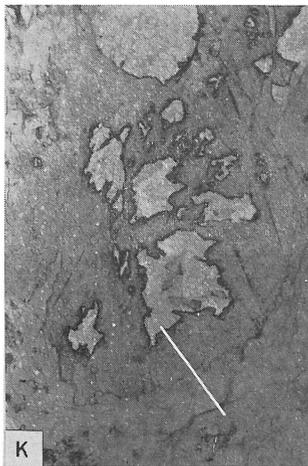
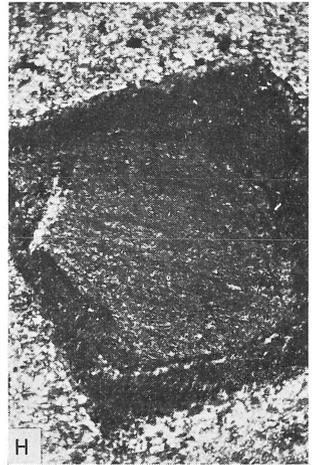
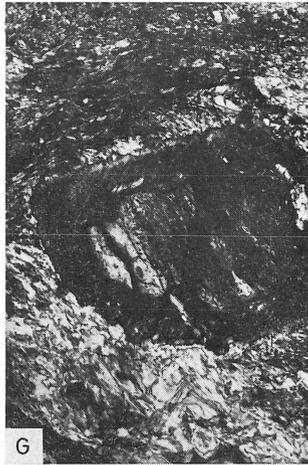
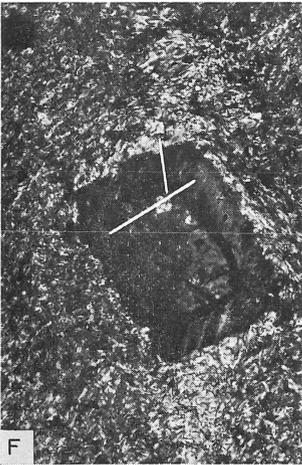
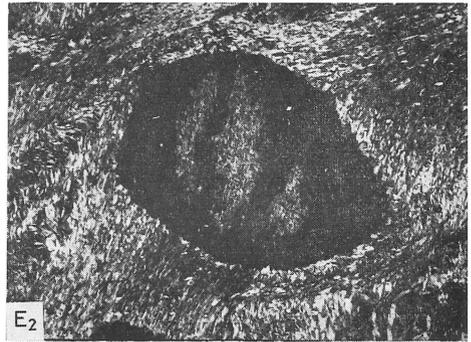
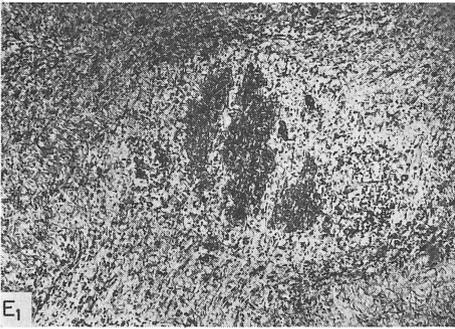
J — La partie droite du champ est occupée par l'andalousite dont nous reconnaissons le clivage. Ce cristal est limité par une frange de kaolinite à structure microfibreuse. Ce minéral s'infiltré également le long des fissures dans l'andalousite, comme il est bien démontré en haut de la photo. A gauche de la photo un agrégat de pyrophyllite et séricite résultant d'une transformation ultérieure de la kaolinite.

K : champ de 0,38 mm sur 0,56 mm en lumière réfléchie (section polie).

L : même champ en lumière transmise, entre nicols croisés.

K, L — On observe au centre du champ plusieurs plages déchiquetées d'andalousite entourées et pénétrées de kaolinite qui prend un moins bon poli (K) et est obscure entre nicols croisés (L). Cette kaolinite est entouré à son tour par un agrégat finement feuilleté de séricite et de pyrophyllite. Le trait blanc marque la ligne suivie par les profils à la microsonde, reproduits à la figure 1 (LM67/1).

PLANCHE II



de spessartine, de rutile et d'hématite, sont les plus répandus; ils sont aussi ceux qui ont été le plus fréquemment mentionnés par les auteurs. Ils ne diffèrent de ceux du type A, que par l'absence des noyaux d'andalousite (Planche I, photos A1-2, B1-2).

3. Spots du type C.

Dans les spots du type C, la kaolinite constitue un noyau qui est entouré par une auréole de séricite. Cette séricite, à la différence de celle qui constitue la pâte de la roche, est constituée de paillettes plus grandes que celles-ci et n'est pas orientée suivant l'une des deux directions de schistosité. Il s'agit d'une séricite néogène.

L'épaisseur de l'auréole de séricite varie d'un échantillon à l'autre, dans certains cas le noyau de kaolinite est de dimension très réduite (Planche I, photos C1-2). Les inclusions de spessartine, de rutile et d'hématite présentent la même disposition que dans les spots des types A et B. Le contour de ces spots n'est plus régulièrement polygonal, mais il est denticulé à l'échelle des paillettes de séricite néogène.

4. Spots du type D.

Les spots du type D, assez fréquents, sont constitués uniquement de séricite à orientation quelconque et néogène, tout comme celle qui constitue l'auréole du type C (Planche I, photos D1-2). Ils contiennent toujours les mêmes inclusions, disposées de la même manière.

Ces différents types constituent apparemment une série continue de transformations progressives de l'andalousite. Quoique nous n'en ayons jamais rencontré d'intactes, il nous paraît évident que le contour polygonal des spots est celui de porphyroblastes d'andalousite, qui ont été progressivement kaolinisés et ensuite séricitisés.

LE FILON DE QUARTZ A ANDALOUSITE

L'échantillon de quartz filonien à andalousite que nous avons étudié est composé de minéraux dont nous avons pu déterminer les caractères optiques, dans des conditions beaucoup plus favorables que celles des roches encaissantes, c.-à-dire les phyllades violacés et le coticule du niveau Sm2b.

Ce filon est composé de quartz, d'andalousite, d'un agrégat phylliteux et d'une chlorite.

L'*andalousite* de filon a déjà été identifiée par J. ANTEN et par F. CORIN; elle forme des cristaux assez grands pour ne poser aucun problème d'identification.

Le *quartz* montre une extinction ondulée ainsi qu'une légère orientation dimensionnelle perpendiculaire aux épontes du filon.

Ce filon est traversé de nombreux *filonnets* qui sont orientés plus ou moins perpendiculairement au contact avec le phyllade; ces filonnets recoupent indifféremment le quartz et l'andalousite et s'arrêtent dans la plupart des cas contre la salbande de chlorite du filon.

Ces petites veines, aux dimensions variables, sont composées d'un *agrégat phylliteux* dans lequel subsistent des reliques de quartz et d'andalousite. Au contact avec les filonnets, l'andalousite s'est transformée en un minéral dont les caractères optiques sont identiques à ceux du minéral subisotrope des spots. Ce minéral s'infiltré aussi le long des plans de clivage et des petites fissures dans les cristaux d'andalousite (Planche II, photos J. L.). Les filonnets, qui parfois forment des plages étendues

TABLEAU I
Résultats des analyses effectuées à la microsonde

	ANDALOUSITE				KAOLINITE				PYROPHYLLITE
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	67/1	67/3	65/2	65/1	67/1	67/3	65/2	65/1	67/1
SiO ₂	37,7 %	36,6 %	38,8 %	42,1 %	44,9 %	45,1 %	47,5 %	48,6 %	62,9 %
Al ₂ O ₃	60,6	60,3	61,3	59,1	39,1	37,5	38,3	36,9	28,8
Fe ₂ O ₃ (*)	1,0	—	—	—	0,7	—	—	—	0,3
MgO	0,2	—	—	—	0,1	—	—	—	0,1
CaO	0,0	—	—	—	0,0	—	—	—	0,1
K ₂ O	0,1	—	—	—	0,2	—	—	—	0,1
H ₂ O ⁺	—	—	—	—	(13,7) (**)	—	—	—	(6,4) (***)
Total	99,6				(98,9) (**)				(98,7) (***)

Formules structurales

	(0) = 20	(0) = 14	(0) = 22
Si	4,10	3,93	7,80 } 8,00
Al	—	—	0,20 } 8,00
Al	7,76	4,02	4,00 } 4,05
Fe ³⁺	0,08	0,05	0,03 } 4,05
Mg	0,03	0,02	0,02 } 4,05
Ca	—	—	0,01 } 0,02
K	0,01	0,02	0,01 } 0,02
OH	—	(8,00) (**)	(4,00) (***)

(*) Fe total exprimé comme Fe₂O₃.

(**) H₂O⁺ calculé sur la base de OH = 8,00.

(***) H₂O⁺ calculé sur la base de OH = 4,00.

entre les grains d'andalousite et de quartz résiduels, comprennent parfois des grandes lamelles de *pyrophyllite*, se reconnaissant à sa teinte d'interférence élevée et dont l'identification a été confirmée par l'analyse à la microsonde (Tableau I, colonne 9). Cette pyrophyllite a parfois cristallisé en un agrégat de lamelles courbes agencées en spirale. La finesse du reste de la masse phylliteuse qui sépare les grains d'andalousite ne permet pas une détermination précise. Cependant, si nous nous rapportons à la couleur d'interférence, il est fort probable qu'une grande partie est formée de *pyrophyllite*, l'autre partie étant formée d'une *séricite* à teinte d'interférence plus basse. Cette hypothèse est confirmée par des essais d'analyse à la microsonde, montrant des fortes variations en potasse le long d'un profil effectué dans cette pâte phylliteuse (Planche II, photo K ainsi que Figure 1, profil LM67/1). Les rapports entre la kaolinite et la pyrophyllite indiquent que la pyrophyllite est un produit de transformation de la kaolinite.

Dans tout le filon, nous retrouvons comme dernier stade de cristallisation une *chlorite* magnésienne incolore et à teinte d'interférence relativement élevée et allongement négatif. Cette chlorite forme également la salbande du filon.

Malgré le fait que notre échantillon n'ait pas été recueilli en place, ses caractères structuraux indiquent clairement que ce filon s'est formé parallèlement à la seconde schistosité du phyllade violacé encaissant.

ANALYSES A LA MICROSONDE

Ainsi que l'on peut s'en rendre compte, l'identification de la kaolinite par voie optique reste incertaine; ce n'est que l'analyse chimique par microsonde et la diffractométrie qui nous donnent une assurance à cet égard. L'analyse par microsonde a d'ailleurs confirmé l'identification de l'andalousite et celle de la pyrophyllite.

L'étude sous la microsonde (appareil AMX, de la firme ARL) du Laboratoire

Fig. 1. — Profils analytiques à la microsonde.

LM67/1

Profils dans le filon de quartz à andalousite suivant le trait marqué sur la photo K de la planche II (voir aussi la photo L).

Ces profils d'environ 110 microns de longueur, débutent à gauche dans l'andalousite, passent ensuite dans l'auréole de kaolinite qui entoure cette andalousite et aboutissent enfin dans la pâte microphylliteuse, composée d'un mélange de *séricite* et de *pyrophyllite*.

Les profils en Al et Si montrent nettement le contact entre l'andalousite et la kaolinite, tandis que les profils Si et K mettent en évidence la différence entre la kaolinite et la pâte phylliteuse; ce sont surtout les pics en K qui sont décisifs pour différencier la kaolinite de la *séricite*. Ce dernier minéral s'aperçoit déjà en traces dans l'auréole de kaolinite, comme l'indiquent les deux pics faibles au début de la traversée dans l'auréole.

LM65/2

Profils à travers un spot du type A, d'un échantillon de coticule prélevé dans la tranchée du chemin de fer au Nord de Salm-Château (photo F de la planche II).

Les profils A-B (40 microns de longueur) et C-D (85 microns de longueur) nous montrent clairement des teneurs en Al et Si, équivalentes à celles des zones correspondantes dans le profil LM67/1.

Le profil en K met bien en évidence le contact entre la pâte phylliteuse (P) de la roche et la kaolinite, contact qui ne se remarque pas dans les profils Al et Si, le long de la même traversée. La kaolinite, qui prend mal le poli, est séparée du noyau d'andalousite par une fente (F) qui se voit également sur la photo F de la planche II.

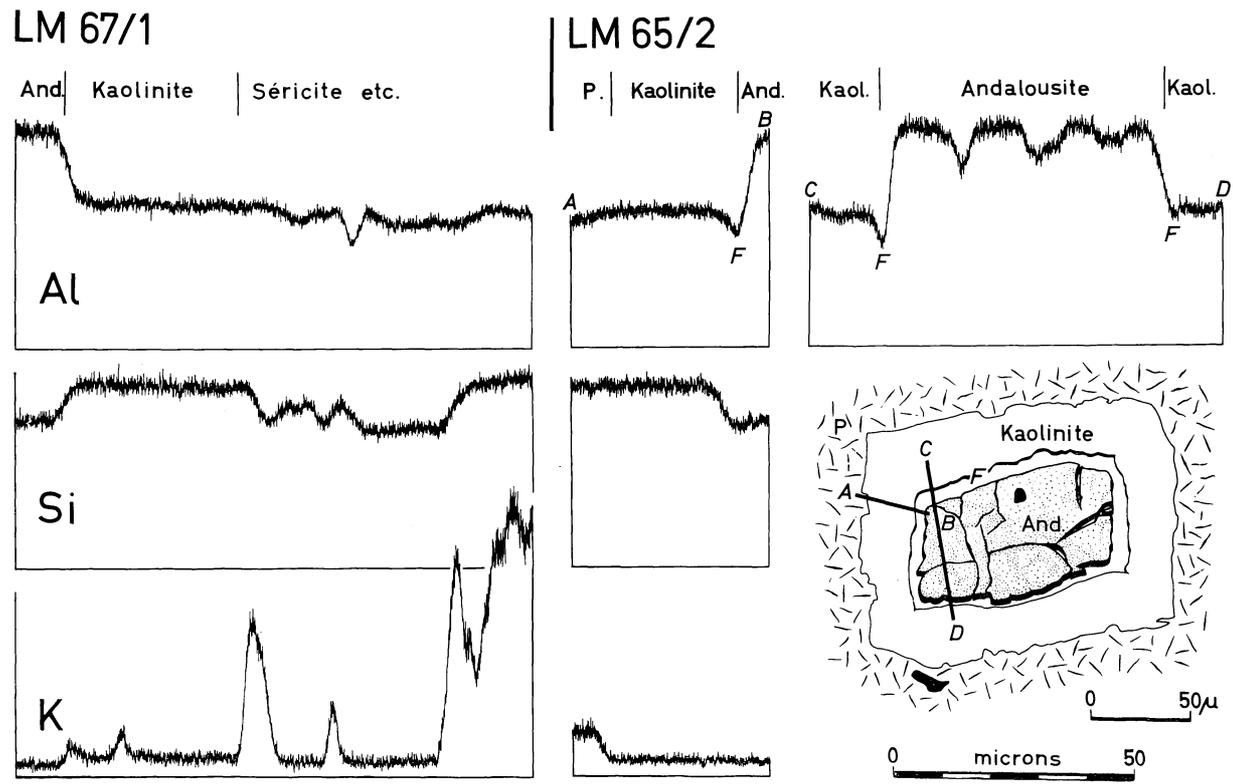


Fig. 1.

de Pétrographie de l'Université, a été conduite sur lame mince polie (CADWELL and WEIBLEN, 1965) et métallisée au carbone. Le travail a été effectué à courant de sonde constant sous 15KV et 20KV, avec un courant d'échantillon de 3 et 8.10^{-8} ampères et avec un cristal ADP pour Si, Al et K et un cristal LiF pour Fe et Ca, et un cristal KAP pour Mg et Na. Les analyses quantitatives ponctuelles sont corrigées pour l'absorption suivant la formule de HEINRICH (1966). Les calculs de correction pour le temps mort, la fluorescence et le nombre atomique sont petits et négligeables. Les traversées (fig. 1) ont été faites en déplaçant l'échantillon au moyen d'un moteur lent (vitesse de 13,3 microns par minute). Les profils enregistrés sont tous pris les uns parallèles aux autres. Il suffit cependant que l'échantillon ait été déplacé de quelques microns, pour que les profils qui ont été pris successivement, ne coïncident plus, ou ne se superposent plus au micron près.

L'analyse à la microsonde s'est heurtée à deux difficultés. La première est due au fait que la kaolinite prend mal le poli (ce n'est que grâce à l'emploi d'une machine à polir Depiereux, que nous avons obtenu des surfaces suffisamment planes). La photo K (Planche II) d'une section polie du filon de quartz, montre que néanmoins il subsiste un certain relief entre l'andalousite et la kaolinite, ainsi qu'entre la kaolinite et la séricite ou la pyrophyllite.

La seconde difficulté résulte de la multitude de petites inclusions de spessartine et de rutile, qui sont contenues dans les spots. Non seulement celles de ces inclusions qui affleurent à la surface polie, mais également celles qui sont contenues dans la masse, en dessous de cette surface, empêchent d'obtenir des résultats décisifs. Les résultats de comptage varient d'un point à l'autre, d'une manière qui les rend difficilement interprétables. Pour cette raison, les premiers essais concluants ont été obtenus sur une préparation du filon de quartz à andalousite. L'andalousite et la kaolinite y sont exemptes des inclusions signalées, ce qui a permis d'obtenir des comptages répétitifs et significatifs (tableau I; analyses 67/1 et 67/3). Une fois ceux-ci obtenus, il a été possible de comparer les profils obtenus sur cette préparation avec ceux obtenus sur des spots (fig. 1, profils LM 65/2 A-B, C-D) et même d'interpréter les comptages effectués sur certains de ceux-ci (tableau I, analyses 65/1-2).

Ainsi qu'on peut le remarquer, les analyses 67/1 (tableau I) permettent le calcul de formules de structure, qui correspondent d'une manière très satisfaisante à celles de l'andalousite, de la kaolinite et de la pyrophyllite. Les résultats 67/3, qui se rapportent à d'autres points de la même préparation sont également très satisfaisants. Les résultats 65/2 et 65/1 qui ont été obtenus respectivement sur le spot de la photo F (Planche II) et sur un autre spot de la même lame donnent une idée des écarts que l'on obtient dans ces cas.

INTERPRÉTATION

Avant de discuter la signification des transformations subies par l'andalousite, en kaolinite et ensuite en séricite ou en pyrophyllite, nous devons rencontrer les opinions de J. ANTEN, partagées par F. CORIN et de G. SPAETH.

Ce dernier auteur n'a pas reconnu la kaolinite, qu'il confond avec l'almandin. Il suppose que la frange de séricite qui entoure les spots du type C, qu'il a observés, manifeste une altération ultérieure du noyau de ces spots en séricite; telle est aussi notre opinion. Nous ne pouvons pas toutefois rapporter le noyau kaolinitique de ces spots, dénués de relief, à l'almandin, comme il le fait sur la seule base de la forme extérieure des spots.

D'autre part, J. ANTEN, suivi par F. CORIN, suppose que les spots kaoliniques du type B, seraient antérieurs au type A, et que la kaolinite représenterait un stade embryonnaire dans la formation de l'andalousite. Pareille opinion pouvait être prise en considération, tant que la kaolinite n'avait pas été identifiée, et que la « Lohestite » pouvait paraître marquer une phase dans la progression du métamorphisme.

Nous remarquerons cependant que :

1) La forme extérieure idioblastique des spots ne peut être celle de la kaolinite qui forme des agrégats polycristallins. Il nous paraît plus raisonnable de la rapporter à l'andalousite, malgré que cette forme ne représente pas un habitus classique de ce minéral.

2) Comme nous l'avons déjà signalé plus haut, un spot dont le centre cristallin est composé de deux ou trois plages d'andalousite (Planche II, photos E1-2) nous montre nettement que l'ensemble des plages possède la même orientation optique. Rien ne nous permet de supposer qu'il s'agirait là de deux ou trois grains d'andalousite ayant cristallisé autour de deux ou trois nuclei différents. En effet, si cette hypothèse était valable, nous devrions rencontrer des spots dont les cristaux d'andalousite n'ont pas tous rigoureusement la même orientation optique. Or, dans les nombreux échantillons que nous avons étudiés, ce phénomène d'orientation optique différente d'un noyau à l'autre, ne se produit que lorsqu'on a affaire à deux ou trois spots adjacents mais clairement indépendants (Planche I, photos A1-2).

3) Nous devons signaler en troisième lieu, que l'auréole des spots est constituée d'un agrégat de kaolinite montrant une orientation constante pour toute l'auréole dans le cas du type A (photos F, G, H, de la planche II), et pour tout le spot dans le cas du type B. Les fissures dans l'andalousite sont aussi remplies de kaolinite de même structure que la kaolinite de l'auréole. Si cette structure est orientée de la même manière à l'intérieur de chaque spot, elle diffère cependant d'un spot à l'autre dans la même lame et ne peut donc être mise en rapport avec une orientation préférentielle résultant d'une phase de déformation tectonique.

4) D'autre part, un minéral phylliteux comme la kaolinite ou la séricite, n'aurait pu subir une phase de déformation tectonique comme celles qui ont donné naissance aux deux schistosités reconnaissables dans la roche, sans être lui-même affecté par cette déformation. Il est évident que les spots qui contiennent des inclusions bien orientées de rutile, sont postérieurs à la première schistosité, responsable de l'orientation de ces inclusions, mais qu'ils existaient sous forme de noyaux rigides au moment où la seconde schistosité, qui les contourne, s'est développée. La transformation du minéral originel en kaolinite, et ultérieurement en séricite, est donc postérieure à la seconde schistosité; elle se situe au cours d'une phase statique, après laquelle la roche n'a d'ailleurs plus subi de déformation tectonique.

Il paraît plus raisonnable de penser que l'andalousite a formé les noyaux rigides et a été transformée en kaolinite, que l'inverse, comme le pensait J. ANTEN. Le même raisonnement conduit à voir une évolution progressive du type A jusqu'au type D.

La présence d'andalousite a d'autre part été interprétée par F. CORIN, comme résultant d'un métamorphisme de contact; cela est conforme aux vues classiques et cette idée ne rencontrait pas de difficulté, tant que la Lohestite était considérée comme un stade antérieur, de la formation de l'andalousite. Le gisement de cette dernière était restreint au voisinage de Vielsalm. Dès que l'on admet que les spots

sont un faciès de transformation de l'andalousite, il faut admettre pour ce minéral une distribution régionale plus large. Il faut d'ailleurs noter que depuis les observations de A. MIYASHIRO (1961) de nombreux auteurs ont reconnu l'andalousite comme minéral typomorphe d'un métamorphisme régional à gradient géothermique particulièrement élevé; H. J. ZWART (1967) a fait ressortir la fréquence de ce type de métamorphisme dans la chaîne hercynienne et y range notamment l'andalousite de Vielsalm. Nous sommes portés à voir dans ce minéral le résultat de ce type de métamorphisme, plutôt que celui d'un métamorphisme de contact.

Ces remarques faites, nous pouvons à présent essayer de reconstituer la succession des événements responsables de la genèse des faits observés.

— Le premier de ces événements est la sédimentation, au cours de l'Ordovicien (Salmien supérieur) de roches suffisamment riches en Al_2O_3 relativement à MgO , FeO et K_2O , pour donner lieu à la formation de l'andalousite par métamorphisme.

— Ce métamorphisme fait suite à une première phase tectonique, responsable de la formation de la première schistosité S1 de la roche, soulignée par l'orientation des rutiles et des séricites. Il peut s'agir ici d'une phase calédonienne, mais cette question reste étrangère à l'objet de cette note.

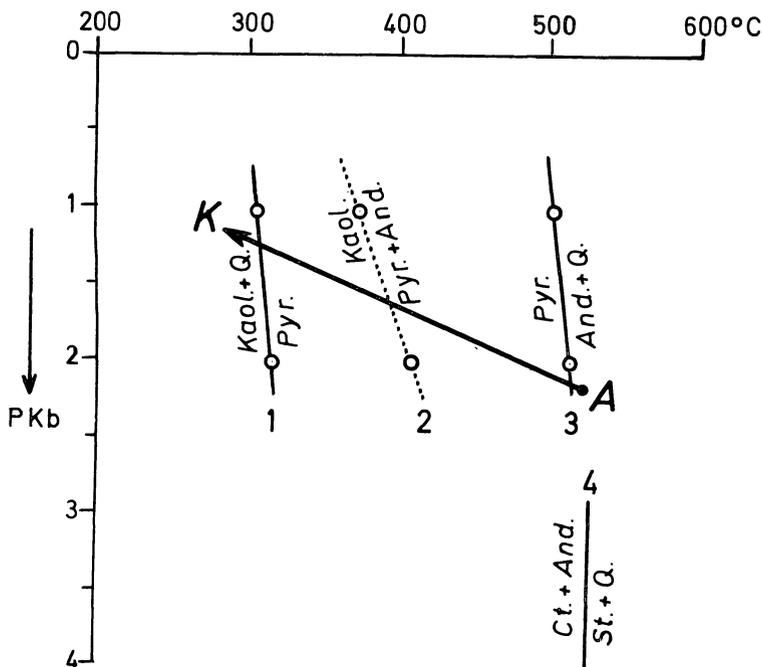


Fig. 2. — Diagramme de stabilité des réactions :

- 1 — kaolinite + quartz = pyrophyllite.
- 2 — kaolinite = pyrophyllite + andalousite.
- 3 — pyrophyllite = andalousite + quartz.
- 4 — chloritoïde + andalousite = staurolite + quartz.

1, 2 et 3, d'après B. VELDE et J. KORNPBST (1969), 4 d'après G. HOSCHEK (1969). La courbe A-K représenterait le rétro-métamorphisme de l'andalousite vers la kaolinite dans la région étudiée.

Dans l'optique de ce diagramme, la formation de la pyrophyllite au dépens de la kaolinite suppose une remontée de la température.

— Ce métamorphisme est marqué (outre la formation du rutile et de la séricite) par l'apparition des minuscules grains de spessartine du cotiucle et des phyllades violacés.

Si l'on s'en rapporte aux essais de synthèse de B. VELDE et J. KORNPROBST (1969) l'apparition de la paragenèse quartz-andalousite, sans pyrophyllite, suppose que l'on ait atteint environ 500° C de température (figure 2, courbe 3). Nous ignorons quelle peut avoir été l'influence de la séricite présente, ni dans quelle mesure elle pourrait avoir abaissé cette température. La pression supérieure compatible avec la présence d'andalousite est controversée; le gradient géothermique doit néanmoins avoir été plus élevé que celui du métamorphisme régional barrovien; nous avons porté sur la figure 2, le point A qui représentait la formation de l'andalousite, en face de la pression de 2 Kb, sans vouloir prendre position sur ce point.

D'autre part, la présence de chloritoïde, et non de staurolite, dans les roches voisines, indique une limite supérieure de température qui ne peut avoir dépassé de beaucoup la valeur de 500° C (G. HOSCHEK, 1969) comme nous l'avons indiqué dans la figure 2, courbe 4.

— C'est après la formation de l'andalousite que la région a subi une deuxième phase de déformation, responsable de la deuxième schistosité S2, qui contourne ici les andalousites, là les chloritoïdes et qui affecte aussi les passées pélitiques à chloritoïde et à grenat, intercalées, dans la poudingue de base du Gedinnien (F. CORIN, 1930). (Nous nous proposons de revenir sur cette question dans un travail ultérieur.) Il s'agit vraisemblablement d'une phase hercynienne, comme le supposent

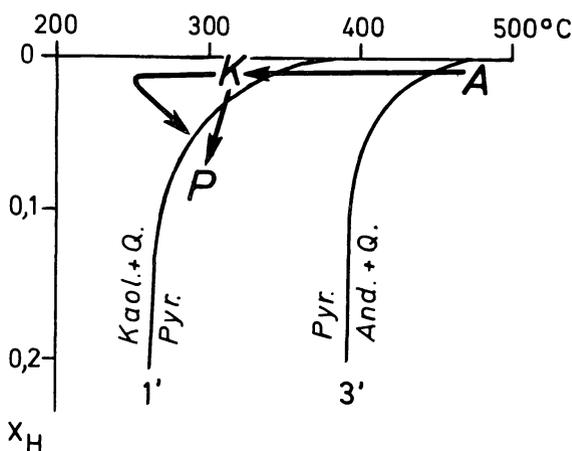


Fig. 3. — Diagramme de stabilité des réactions 1 et 3 de la figure 2, montrant l'influence du degré d'acidité (d'après E. ALTHAUS, 1966).

La courbe A-K-P représente l'évolution de l'andalousite (A) vers la pyrophyllite (P), en passant par la kaolinite (K).

On peut envisager deux possibilités :

- ou bien descendant en dessous de la limite de température et puis en remontant vers des températures plus hautes,
- ou bien tout simplement accompagnée d'une augmentation du degré d'acidité avec une diminution de température.

aussi H. J. ZWART et J. OELE (1966) (en se référant d'ailleurs aux « grenats » de G. SPAETH, qui sont, en réalité des andalousites transformées).

— Les conditions favorables à la formation de l'andalousite en présence de quartz et sans pyrophyllite, persistent durant la phase de mise en place des filons de quartz à andalousite, qui suivent la même direction que celle du plan de schistosité S2. On peut rapprocher la formation de ces filons de celle des filons à chloritoïde, décrits par J. MICHOT (1955) dans la même région.

— Ce n'est donc que plus tard que l'on peut situer la phase, à température plus basse, à laquelle l'andalousite peut, à la suite d'un apport d'eau, se transformer en kaolinite. Cette transformation doit s'être faite au-delà de la courbe 1 (fig. 2) de B. VELDE et J. KORNPORST (1969), c.-à-d. en dessous de 300°C environ.

Si l'on s'en tient à ce seul diagramme, l'apparition ultérieure de la pyrophyllite nécessiterait une nouvelle augmentation de la température, ce qui n'est pas invraisemblable dans un filon. On remarquera cependant à cet égard que les résultats expérimentaux de E. ALTHAUS (1966) permettent de proposer une autre interprétation. Les travaux de cet auteur nous montrent en effet que la température d'équilibre de la réaction « pyrophyllite = quartz + kaolinite », est abaissée considérablement par une augmentation du degré d'acidité du milieu (courbe 1', fig. 3). Si les solutions hydrothermales du filon de quartz ont évolué dans ce sens, la transformation de kaolinite en pyrophyllite ne répondrait pas nécessairement à une bouffée thermique, mais pourrait même s'être produite au cours d'un abaissement de la température.

On peut de même se demander si la séricitisation de la kaolinite de spots du type C et D ne résulte pas d'une remobilisation de la potasse plutôt que d'une reprise du métamorphisme. Dans la mesure où ces hypothèses sont fondées, la kaolinisation de l'andalousite, ainsi que la pyrophyllitisation et la séricitisation ultérieure de cette kaolinite représenteraient deux phases d'un épisode de rétro-métamorphisme, de caractère hydrothermal.

REMERCIEMENTS

Notre reconnaissance va d'abord à Monsieur le Professeur F. GEUKENS, qui nous a introduit dans les problèmes de la Géologie du Salmien.

Le Professeur P. DE BÉTHUNE par ses conseils et les fructueuses discussions que nous avons eues avec lui nous fût d'une aide précieuse tout au long de l'élaboration de ce travail. Qu'il en soit très sincèrement remercié.

Nos remerciements s'adressent également à Messieurs D. LADURON et H. MARTIN qui nous ont fait part de leurs critiques lors de nombreuses discussions.

Notre gratitude s'adresse aussi au Fonds de la Recherche Fondamentale Collective qui a doté le laboratoire, de la microsonde.

Nous associons également à ces remerciements M. GUSTAVE DOUCET qui a surmonté les difficultés du polissage de nos échantillons et M. CYRIEL MOLDENAERS qui nous a préparé des centaines de lames minces, ainsi que les autres membres du personnel du laboratoire de Pétrographie.

BIBLIOGRAPHIE

- ALTHAUS, E., 1966. — Der Stabilitätsbereich des Pyrophyllits unter dem Einfluss von Säuren. *Contr. Miner. and Petrol.*, 13, pp. 31-50 et 97-107.
- ANTEN, J., 1912. — Contribution à l'étude du Salmien métamorphique du Sud du massif de Stavelot dans la région de Recht. *Ann. Soc. Géol. de Belgique*, t. 39, pp. M 397-M 417.

- ANTEN, J., 1913. — Sur la stratigraphie et la tectonique du Cambrien supérieur au Sud de Vielsalm. *Ann. Soc. Géol. de Belgique*, t. 41, pp. m 31-m 47.
- ANTEN, J., 1923. — Le Salmien métamorphique du Sud du massif de Stavelot. *Mém.* 1299, *Acad. roy. de Belgique*.
- ANTEN, J., 1924. — A propos des noyaux du phyllade oligistifère et spessartinifère à coticule. *Ann. Soc. Géol. de Belgique*, t. 48, pp. B 197-B 198.
- CADWELL, D. E. and WEIBLEN, P. W., 1965. — Diamond disc preparation of polished thin sections for electron microprobe analysis. *Econ. Geol.*, 60, pp. 1320-1325.
- CAYEUX, L., 1916. — Introduction à l'étude Pétrographique des Roches Sédimentaires. Mémoires pour servir à l'explication de la carte géologique détaillée de la France.
- CORIN, F., 1924. — Note sur la présence de coticule très métamorphique au Nord du défilé de la Salm. *Ann. Soc. Géol. de Belgique*, t. 48, pp. B 198-B 199.
- CORIN, F., 1930. — La bordure gedinnienne métamorphique du Sud du massif de Stavelot. *Ann. Soc. Géol. de Belgique*, t. 53, pp. B 27.
- CORIN, F., 1931. — Le métamorphisme de Vielsalm. *Ann. Soc. scient. de Bruxelles*, 51, série 5, pp. 57-71.
- CORIN, F., 1963. — Über Knoten in Phylliten des Salmien von Recht, Vielsalm und Ottré (Ost-Ardennen). *Geol. Mitt.*, 3, pp. 179-184.
- CORIN, F., 1964. — Ergänzung zum Aufsatz « Über Knoten in Phylliten des Salmien von Recht, Vielsalm und Ottré (Ost-Ardennen) ». *Geol. Mitt.*, 4, pp. 111-112.
- DORLODOT, L., DE, 1910. — Contribution à l'étude du métamorphisme du massif cambrien de Stavelot. *Ann. Soc. Géol. de Belgique*, t. 37, pp. 145-194.
- DUMONT, A. H., 1848. — Mémoire sur les terrains ardennais et rhénans. *Mém.*, 20, Acad. roy. de Belgique.
- GEUKENS, F., 1965. — Problème stratigraphique relatif aux planchettes Odeigne-Bihain. *Bull. Soc. belge de Géologie*, t. 74, pp. 214-219.
- GEUKENS, F., 1969. — De ouderdom der druksplijting in het caledonisch Massief van Stavelot. *Med. Kon. Vl. Acad., Klasse der Wet.*, Jg. 31, nr. 4.
- GOSSELET, J., 1888. — Études sur l'origine de l'ottrélite. 1^e étude : l'ottrélite dans le Salmien supérieur. *Ann. Soc. Géol. du Nord, Lille*, t. 15, pp. 185-215.
- HEINRICH, K. F. J., 1966. — X-Ray Absorption Uncertainty. In : « The Electron Microprobe » (T. D. McKinley, K. F. J. Heinrich and D. B. Wittry), John Wiley and Sons, Inc., New-York, pp. 296-377.
- HOSCHEK, G., 1969. — The Stability of Staurolite and Chloritoid and their Significance in Metamorphism of Pelitic Rocks. *Contr. Miner. and Petrol.*, 22, pp. 208-232.
- LOHEST, M., 1911. — Sur le métamorphisme de la zone de Salmchâteau. *Ann. Soc. Géol. de Belgique*, t. 38, pp. m 11-m 25.
- MICHOT, J., 1955. — La genèse du chloritoïde en milieu statique. *Ann. Soc. Géol. de Belgique*, t. 78, pp. m 3-m 54.
- MIYASHIRO, A., 1961. — Evolution of metamorphic belts. *J. Petrol.*, 2, pp. 277-311.
- PHILIBERT, J., 1963. — A method for Calculating the absorption correction in Electron-Probe Microanalysis. In : « X-Ray Optics and X-Ray Microanalysis ». (H. H. Pattee, V. E. Cosslett and A. Engström, eds). Academic Press Inc., New-York, pp. 379-392.
- SPAETH, G., 1962. — Zur Baugeschichte der Ardennen III : Über rotierte Granatporphyroblasten in Phylliten des Salmien von Ottré (Ost-Ardennen). *Géol. Mitt.*, 3, pp. 97-105.
- VELDE, B. et KORNPÖBST, J., 1969. — Stabilité des silicates d'alumine hydratés. *Contr. Miner. and Petrol.*, 21, pp. 63-74.
- ZWART, H. J. and OELE, J. A., 1966. — Rotated magnetite crystals from the Rocroi massif (Ardennen). *Geol. en Mijnbouw*, 45, pp. 70-74.
- ZWART, H. J., 1967. — The duality of orogenic belts. *Geol. en Mijnbouw*, 46, pp. 283-309.

