

<b>Zeitschrift:</b>	Schweizerische mineralogische und petrographische Mitteilungen = Bulletin suisse de minéralogie et pétrographie
<b>Band:</b>	74 (1994)
<b>Heft:</b>	2
<b>Artikel:</b>	Les veines à andalousite du Pischahorn (Grisons, Suisse) = Andalusite veins from the Pischahorn (Grisons, Switzerland)
<b>Autor:</b>	Brugger, Joël
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-56341">https://doi.org/10.5169/seals-56341</a>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 18.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

## Les veines à andalousite du Pischahorn (Grisons, Suisse)

## Andalusite veins from the Pischahorn (Grisons, Switzerland)

par *Joël Brugger*<sup>1</sup>

### Abstract

New structural and mineralogical data about the quartz-andalusite and/or muscovite, albite veins occurring near the Pischahorn mountain (Grisons, Switzerland) are presented. The veins are closely related to micaschists and staurolite-micaschists within a thick paragneissic sequence belonging to the polymetamorphic basement of the Upper Austroalpine Silvretta nappe.

The veins display a large spectrum of morphologies which reflect their crystallization in a dynamic context. The recognition of the syn- or post-D3 emplacement of the veins and the existence of kyanite relics being replaced by andalusite in one vein leads to a modification of the Late Variscan Pressure-Temperature path followed by the Silvretta nappe basement.

**Keywords:** andalusite, veins, Variscan, P-T path, Silvretta nappe, Austroalpine realm.

### Résumé

De nouvelles observations structurales et minéralogiques sur les veines à quartz, andalousite et/ou muscovite, albite affleurant au pied du Pischahorn (Grisons, Suisse) sont présentées. Les veines sont étroitement liées à des niveaux de micaschistes et micaschistes à staurolite au sein d'une puissante série de paragneiss appartenant au socle polymétamorphique de la nappe Austroalpin supérieur de la Silvretta.

La grande diversité morphologique des veines reflète leur mise en place dans un contexte dynamique de cristallisation/déformation. La reconnaissance de la situation syn- à post-D<sub>3</sub> des veines et la présence de reliques de disthène en cours de remplacement par l'andalousite dans une veine amènent à revoir l'évolution pression-température tardi-varisque du socle de la nappe de la Silvretta.

### 1. Introduction

Dans le cadre d'un travail de diplôme (BRUGGER, 1992), la cartographie pétrographique détaillée (1:10 000) de 15 km<sup>2</sup> de terrain au pied du Pischahorn (Fig. 1) sur le flanc nord du Flüelatal non loin de la station de Davos a été réalisée en 1990/1991. Cette région est connue depuis longtemps (GRAMMAN, 1899) pour la riche occurrence de grands (> 20 cm) cristaux d'andalousite dans des veines de quartz. SPAENHAUER (1933) récapitule les connaissances sur l'andalousite de la nappe de la Silvretta en les complétant par une description

microscopique détaillée. Cette synthèse sert actuellement de base aux interprétations géodynamiques (FLISCH, 1987).

Généralement parlant, les veines à silicates d'alumine apparaissent dans une grande variété de contextes qui dénotent une mobilité de l'aluminium dans un large spectre de conditions P, T, x:

- métamorphisme de contact (ex. «Rieserferner-Diorit», CESARE, 1992);
- métamorphisme régional (ex. Alpes Léponaines, KELLER, 1968);
- «Pegmatites» (ex. Dolní Bory, Moravie de

<sup>1</sup> Institut de Minéralogie et Pétrographie, Université, Pérolles, CH-1700 Fribourg, Suisse.

Adresse actuelle: Institut für Mineralogie und Petrographie, Universität, Bernoullistrasse 30, CH-4056 Basel, Suisse.

l'ouest, Tchécoslovaquie, NOVACK et SREIN, 1989; l'andalousite y est associée au diaspor et à des minéraux typiques des pegmatites tels que monazite, triphylite, Nb-wolframite).

Cette étude présente de nouvelles observations minéralogiques et structurales qui cernent le contexte de mise en place des veines sur le Pischahorn et contribuent à la compréhension d'un événement marquant de l'histoire tardi-varisque de la nappe de la Silvretta.

## 2. Contexte géologique

Le Pischahorn appartient à la nappe Austroalpin supérieur de la Silvretta, l'élément structural le plus élevé du bâti alpin en Suisse. La nappe de la Silvretta est formée essentiellement par un socle cristallin polymétamorphe (Fig. 1) dont l'évolution complexe a été discutée récemment par MAGGETTI et FLISCH (1993).

La région du Pischahorn est constitué d'une épaisse ( $> 1000$  m) série de paragneiss. La schistosité principale  $S_2$  (parallèle aux limites lithologiques) est très bien développée; son pendage moyen est constant ( $35^\circ$  vers N140) sur toute la surface du terrain étudié. Cette schistosité porte une linéation  $L_2$  (surtout biotite) plongeant vers l'ouest.

À la base (du point de vue topographique) de la série des paragneiss dominent des lithologies monotones de gneiss à biotite-plagioclase avec quelques quartzites et de très rares lentilles calcosilicatées; au sommet les paragneiss deviennent très hétérogènes, avec des alternances décimétriques à métriques de gneiss à biotite-plagioclase, quartzites, micaschistes, micaschistes à staurolite-grenat (voir STRECKEISEN [1928] pour une description précise de ces lithologies). Deux minuscules pointements de «roche léopard» («Flekkengestein» des auteurs germanophones, voir VON DER CRONE [1989]) ont en outre été reconnus.

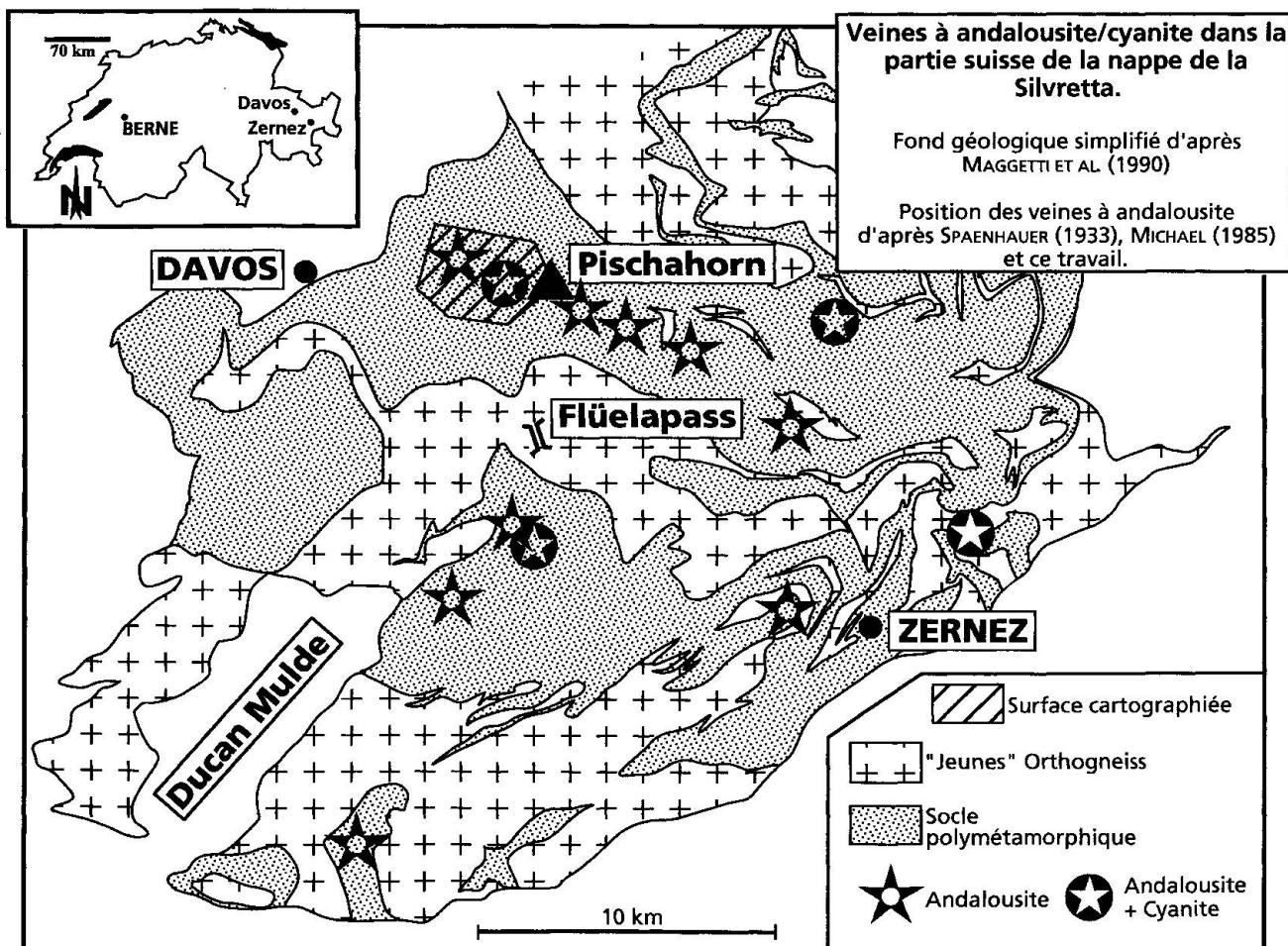


Fig. 1 Carte géologique schématique de la partie suisse de la nappe de la Silvretta avec indication du terrain cartographié dans le cadre de cette étude et des gisements d'andalousite ou andalousite + disthène reconnus par SPAENHAUER (1933), MICHAEL (1986) et ce travail.

Tab. 1 Phases de déformation reconnues dans les paragneiss de la nappe de la Silvretta par FLISCH (1987). Compléments entre crochets.

Phase	Eléments tectoniques	Cycle	Age absolu
D <sub>1</sub>	Déformation anté-varisque (essentiellement paragenèse relique de haute pression dans des yeux de plagioclase; MAGGETTI, 1986)	Pré-varisque	
D <sub>2</sub>	Schistosité principale varisque S <sub>2</sub> (faciès amphibolite); plis isoclinaux F <sub>2</sub> associés	Varisque	370 ± 17 Ma (Rb/Sr petite échelle; FLISCH [1987])
D <sub>3</sub>	Plis isoclinaux F <sub>3</sub> qui déforment la schistosité S <sub>2</sub> ; schistosité S <sub>3</sub> localement dans les lithologies favorables	Varisque	
	Refroidissement au-dessous de 350–300 °C		330–280 Ma (K–Ar sur biotite et muscovite; FLISCH [1987])
D <sub>4</sub>	Essentiellement système complexe de «Shear bands»	Tardi-varisque	
D <sub>5</sub>	Déformation alpine (surtout représentée par des cataclasites sur le Pischahorn)	Alpin	

Les affleurements du sommet de cette série bénéficient d'un poli glaciaire qui permet une vision optimale des structures.

Ces paragneiss sont limités au nord par une association gneissique complexe (gneiss œillé type Tschuggen, gneiss œillé type Mönchhalp, gneiss à hornblende, amphibolites), à l'est par des bandes d'amphibolites, à l'ouest par la couverture parautochtone et le chevauchement basal de la nappe et au sud par la vallée de la Fluela.

Les éléments tectoniques reconnus dans les paragneiss sont résumés dans le tableau 1.

### 3. Description des veines à andalousite

#### 3.1. RÉPARTITION DES VEINES

Des veines à andalousite (cohabitent dans quelques localités avec le disthène) ont été décrivées sur toute la surface de la nappe de la Silvretta, toujours en association avec des paragneiss (SPAENHAUER [1933]; Fig. 1).

Sur le Pischahorn, la cartographie a précisé cette dépendance lithologique. Des veines stériles à quartz, de morphologie identique aux veines minéralisées en andalousite, apparaissent dans toutes les lithologies (elles sont toutefois particulièrement abondantes dans les micaschistes). Ces veines ne contiennent jamais d'andalousite lorsqu'elles sont encaissées dans des orthogneiss ou des amphibolites. L'andalousite est un hôte spo-

radique des veines des gneiss à biotite-plagioclase (méta-grauwacke, BOLLIN [1993]), qui devient très abondant dans les veines des micaschistes.

#### 3.2. CONTENU DES VEINES

On peut distinguer trois paragenèses primaires dans les veines à andalousite du Pischahorn (tableau 2), plus un cas particulier avec coexistence d'andalousite et de disthène.

– Le *quartz*, macroscopiquement massif, se sépare sous le microscope en domaines de 1 à 7 mm d'extinction oblique les uns par rapport aux autres. Les contacts entre ces domaines sont finement découpés.

– L'*andalousite* forme des cristaux rouge-violet (lorsque fraîche) à lie de vin, qui peuvent dépasser 20 cm; ces cristaux ne montrent habituellement qu'un prisme terminé par un pinacocïde; la bipyramide {111} apparaît très rarement. Sous le microscope l'andalousite dévoile un état avancé d'altération. De la «séricite» encroûte les cristaux, s'insère dans les plans de clivage et les fractures. Les diagrammes de poudre (diffractomètre SIEMENS D500, radiation CuK<sub>α</sub>) réalisés à partir de douze monocristaux macroscopiquement homogènes dans divers états de fraîcheur ont tous révélé la présence de muscovite-2M + diaspore + chlorite; la boehmite et la paragonite apparaissent parfois. L'étude à la microsonde électronique des minéraux d'altération de l'andalousite n'a permis

Tab. 2 Minéraux primaires (cristallisés lors de l'ouverture des veines, par opposition aux minéraux d'altération) dans les veines à andalousite.

A. Dans les veines concordantes	B. Dans les «fractures» entre les boudins	C. Dans les veines discordantes
<ul style="list-style-type: none"> <li>Quartz blanc à incolore</li> <li>Andalousite en cristaux noyés dans la masse de quartz, parfois en amas</li> <li>Albite en cristaux noyés dans la masse de quartz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Quartz blanc à incolore</li> <li>Andalousite souvent en amas</li> <li>Muscovite en amas de feuillets centimétriques</li> <li>Albite</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Quartz bleuté</li> <li>Andalousite rare, souvent aux éponges</li> <li>Albite rare, aux éponges ou dans des fractures</li> </ul>
<p>Accessoires: ilménite. Les rares tourmaline (Scalettahorn, Sassauta) et corindon (sans localité) décrits par SPAENHAUER (1933) n'ont pas été observés aux environs du Pischahorn.</p>		

d'isoler ni le diaspore ni la boehmite; ces minéraux doivent donc être très finement dispersés ( $< 2 \mu\text{m}$ ). L'analyse chimique de l'andalousite (analyse 1, tableau III) montre un minéral pauvre en traces.

Les cristaux d'andalousite possèdent rarement une zonation optiquement décelable. Un échantillon observé en cathodoluminescence (*Cold cathode Luminescence Model 8200 MKII*, Institut de Géologie de Fribourg, opération 300–400  $\mu\text{A}$ , 17–20 kV) infirme cette simplicité: malgré la faible luminescence du minéral, des domaines de 0.2 à 1 mm apparaissent, souvent liés à une fracture. La géométrie de ces domaines est généralement simple (triangle ou quadrilatéral); les contacts sont francs et rectilignes.

La cause de ces nuances dans la luminescence est inconnue (MILLER, 1988); il faut la rechercher dans de fines variations chimiques, éventuellement corrélées à des défauts dans le réseau cristallin du minéral (KERRICK, 1990).

– Les différentes variétés de mica clair des veines ont été étudiées par microsonde électronique et diffractométrie.

La muscovite grossière (analyse 3, tableau 3) des veines présente un chimisme stable; le rapport  $\frac{\text{Na}}{\text{Na} + \text{K}}$  est compris entre 0.17 et 0.21 (Fig. 2); notons aussi la faible teneur en fluor ( $< 0.1\%$  poids).

L'analyse des muscovites qui croissent dans la schistosité  $S_2$  des micaschistes (analyse 2, tableau 3) a montré l'identité chimique de ces deux micas.

Le mica clair fin qui constitue plus de 90% vol de l'altération des cristaux d'andalousite se compose d'un terme paragonitique (analyse 4, tableau 3) et d'un terme muscovitique; sur le diffractogramme apparaissent les pics (002) de la muscovite-2M et de la paragonite. La qualité

médiocre des analyses à la microsonde électronique (due à des effets de polissage et à l'intercroissance à l'échelle micrométrique des deux phases) interdit pour l'instant une utilisation du couple muscovite-paragonite comme géothermomètre.

– Le plagioclase des veines est toujours une albite (l'analyse qualitative à l'EDS montre le cal-

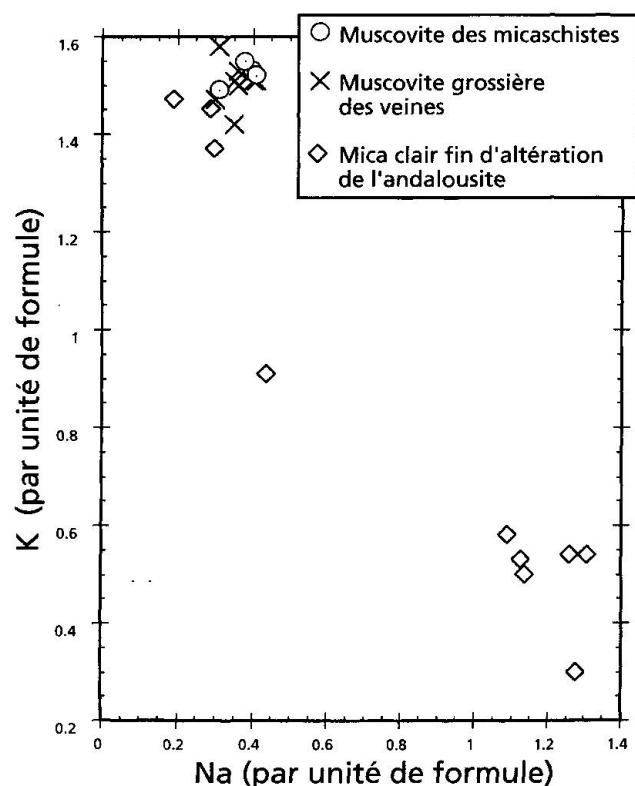


Fig. 2 Rapports Na/K (atomes par unité de formule, normalisation sur 22 oxygènes) dans différentes générations de micas clairs (analyses ponctuelles à la microsonde électronique).

Tab. 3 Composition chimique représentative d'andalousite et de micas clairs. JB150, lentille inter-boudin avec andalousite et muscovite grossière abondante, coord. 790.130/187.830. JB188, micaschiste à staurotide, coord. 788.450/187.920.

Minéral	Andalousite	Muscovite dans micaschiste	Muscovite grossière dans veine	Mica clair fin d'altération andalousite
Analyse N°	(1) JB150 FX	(2) JB188 MS	(3) JB 150 MS	(4) JB150 MS
(% poids)				
SiO <sub>2</sub>	37.07	46.42	46.59	47.34
TiO <sub>2</sub>	0.05	0.39	0.17	0.05
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	61.00	36.70	36.79	38.87
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.22	N.D.	N.D.	N.D.
FeO	0.13	0.67*	0.68*	0.10*
MnO	< 0.01	0.00	0.00	0.01
MgO	0.16	0.43	0.29	0.05
CaO	0.03	0.00	0.00	0.24
Na <sub>2</sub> O	0.19 <sup>m</sup>	1.55	1.57	5.06
K <sub>2</sub> O	0.49 <sup>m</sup>	8.99	9.12	3.27
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.04	N.D.	N.D.	N.D.
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	0.82	N.D.	N.D.	N.D.
CO <sub>2</sub>	0.17	N.D.	N.D.	N.D.
F	N.D.	0.01	0.06	0.04
Somme	100.38	95.16	95.27	95.03
Traces (ppm)				
Ba	137 <sup>m</sup>	Normalisation <sup>n</sup>		
Cr	42	Si	6.12	6.09
Cu	10	Al <sup>IV</sup>	1.88	1.91
Ga	60	Al <sup>VI</sup>	3.83	3.99
Nb	< 1	Ti	0.04	0.00
Ni	6	Fe <sub>tot</sub>	0.07	0.01
Pb	2	Mn	0.00	0.00
Rb	19	Mg	0.08	0.01
Sr	16	Na	0.40	1.26
Th	16	K	1.51	0.54
V	84	Ca	0.00	0.03
Y	< 1	F	0.00	0.02
Zn	6			
Zr	2			

FX = analyse par fluorescence X sur 5 mg de poudre, complétée par la détermination de FeO par colorimétrie et de CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O par infrarouge; MS = analyse ponctuelle à la microsonde électronique. N.D. = élément non dosé.

\* Fer total comme FeO.

<sup>m</sup> Ces éléments sont corrélés avec des impuretés de mica clair.

<sup>n</sup> Normalisation sur 22 oxygènes d'après HOLDWAY et al. (1988).

cium à la limite de la détection) dans un état variable de séricitisation.

— Le *disthène* n'a été détecté que dans une unique veine concordante (JB300, coord. 789.670/187.380). Les cristaux de *disthène* atteignent 10 cm; une pseudomorphose par l'andalousite est visible macroscopiquement (cristaux d'andalousite conservant la morphologie du *disthène*). Cette réaction *disthène* → andalousite est confirmée sous le microscope: les cristaux de *disthène*

sont entourés par de l'andalousite; cette dernière se développe aussi à l'intérieur des reliques de *disthène* sur des défauts des cristaux (pli, fracture). SPAENHAUER (1933, p. 335) illustre une coexistence semblable; il lui est cependant difficile de décider entre *disthène* pré-, syn- ou post-andalousite; dans sa conclusion il préfère la dernière hypothèse, principalement à cause d'arguments liés à la méconnaissance de la minéralogie des polymorphes Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> à cette époque.

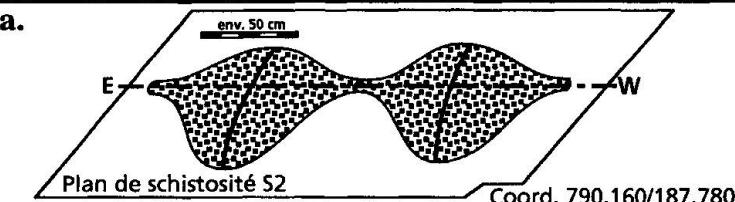
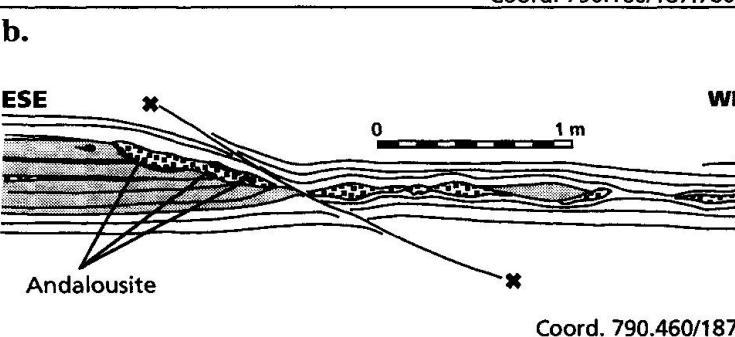
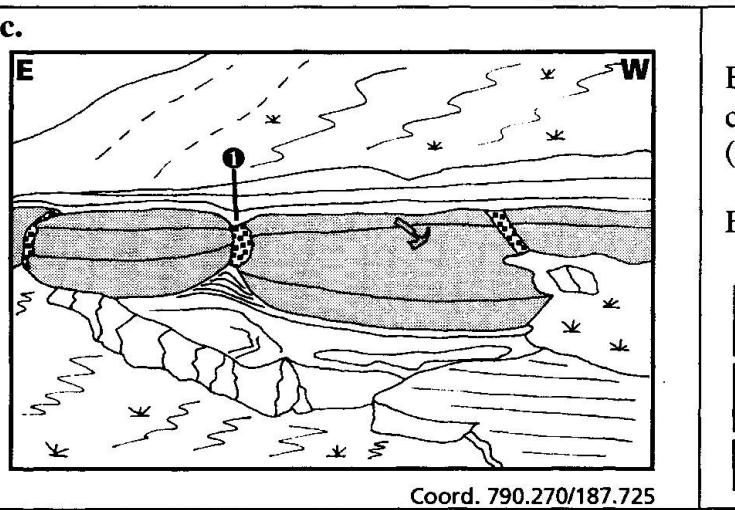
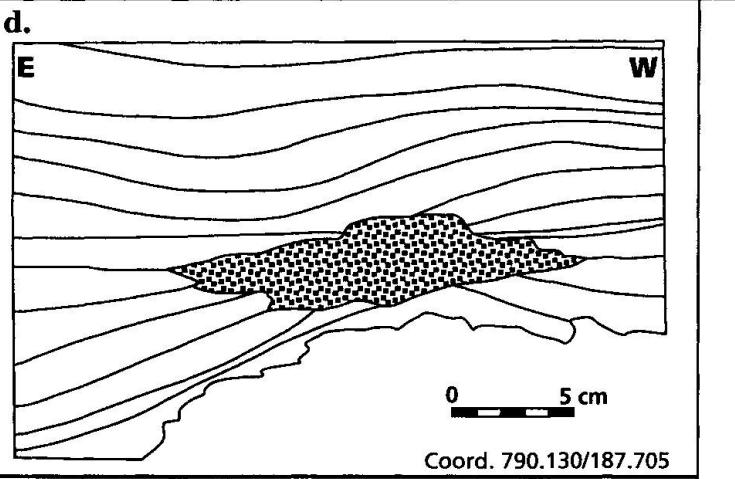
Exemple	Interprétation				
<p>a.</p>  <p>Plan de schistosité S2</p> <p>Coord. 790.160/187.780</p>	<p>Boudinage syn-cristallisation de la veine</p>				
<p>b.</p>  <p>ESE</p> <p>WNW</p> <p>Andalusite</p> <p>Coord. 790.460/187.320</p>	<p>Exsudat associé au boudinage d'un corps compétent dans les schistes (faible différence de compétence)</p> <p>Modifié d'après RAMSAY (1967)</p>				
<p>c.</p>  <p>E</p> <p>W</p> <p>1</p> <p>Coord. 790.270/187.725</p>	<p>Exsudat associé au boudinage d'un corps compétent inclu dans les schistes (forte différence de compétence)</p> <p>En (1) : quartz + muscovite + andalousite</p> <p>Modifié d'après RAMSAY (1967)</p>				
<p>d.</p>  <p>E</p> <p>W</p> <p>1</p> <p>0 5 cm</p> <p>Coord. 790.130/187.705</p>	<p>Modifié d'après PLATT et VISSERS (1980)</p> <p>a: Fractures d'extension</p> <p>b: ouverture</p> <p>c: aplatissement</p>				
<p>Légende</p> <table border="1"> <tr> <td></td> <td>Exsudat (quartz, autres minéraux si précisé)</td> <td></td> <td>Lithologie riche en quartz</td> </tr> </table>		Exsudat (quartz, autres minéraux si précisé)		Lithologie riche en quartz	<p>"Foliation Boudinage" décrit par PLATT et VISSERS (1980). Une fracture d'extension évolue vers un boudin.</p>
	Exsudat (quartz, autres minéraux si précisé)		Lithologie riche en quartz		

Fig. 3 Morphologie des veines à andalousite concordantes trouvées aux environs du Pischahorn.

### 3.3. MORPHOLOGIE DES VEINES

Deux types morphologiques de veines se distinguent sur le terrain étudié: les veines qui se développent dans la schistosité varisque principale  $S_2$  (veines «concordantes») et les veines nettement discordantes par rapport à cette schistosité.

Les principaux types morphologiques de veines trouvés sur le Pischahorn sont décrits à l'aide des figures 3 à 6; la numérotation des types se réfère à ces figures.

#### 3.3.1. Veines concordantes (Fig. 3)

Le type 3a est le plus fréquemment rencontré et le plus richement minéralisé en andalousite. Les cristaux d'andalousite «nagent» dans la gangue de quartz. Ils présentent parfois une orientation préférentielle parallèle à l'axe d'allongement du boudin; cet axe s'oriente E-W.

La formation d'un tel boudin ne représente pas nécessairement un événement biphasé (mise en place – déformation). RAMBERG (1956) a reconnu sur les pegmatites du Groenland un processus continu de cristallisation-déformation (la veine pegmatoïde, de par la taille des cristaux qui la constituent et l'absence de texture planaire, est un élément compétent qui est déformé) qui produit des veines boudinées en un seul cycle.

Dans le type 3b les veines sont associées au boudinage d'un niveau compétent noyé dans les

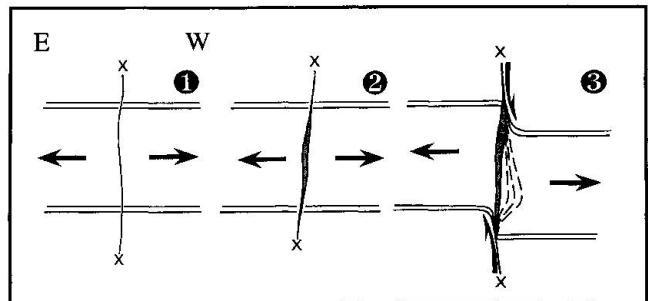


Fig. 5 Schéma d'évolution de la veine N° 1 de la figure 4.

- (1): Initiation d'une fracture d'extension.
- (2): Ouverture de la fracture; précipitation dans le vide ainsi créé.
- (3): La veine en cours de formation est un élément compétent qui modifie la répartition des contraintes au sein du micaschiste; un régime cisaillant se met en place autour de la veine.

schistes, en général une quartzite. Les veines se développent

- dans le corps même de la quartzite,
- dans l'axe du boudinage; les veines prennent alors elles-mêmes un aspect boudiné.

L'andalousite se concentre souvent aux environs de failles (c'est le cas dans la Fig. 3b) qui indiquent une extension parallèle à l'axe de boudinage et semblent contemporaines de ce dernier. Ces fractures ont favorisé le drainage des fluides porteurs de l'aluminium.

Dans le type 3c, les veines occupent les fractures issues du boudinage d'un niveau de quartzite au sein des micaschistes. Le remplissage de ce type de fracture est souvent constitué d'andalousite (cristaux idiomorphes sans orientation préférentielle) dans une gangue de muscovite grossière (feuilles centimétriques) et de quartz.

Dans les figures 3b–3c la schistosité épouse les contours du boudin; le boudinage est initié dans un niveau compétent par rapport à son encaissant par une compression perpendiculaire à l'axe de boudinage ou une extension parallèle à cet axe (RAMSAY, 1967). Par contre le boudin de la figure 3d est confiné dans un micaschiste homogène; la schistosité du micaschiste pénètre à l'intérieur du boudin. Il s'agit d'un «foliation boudinage» au sens de PLATT et VISSERS (1980). Ce type de boudin indique une extension parallèle à l'axe de boudinage.

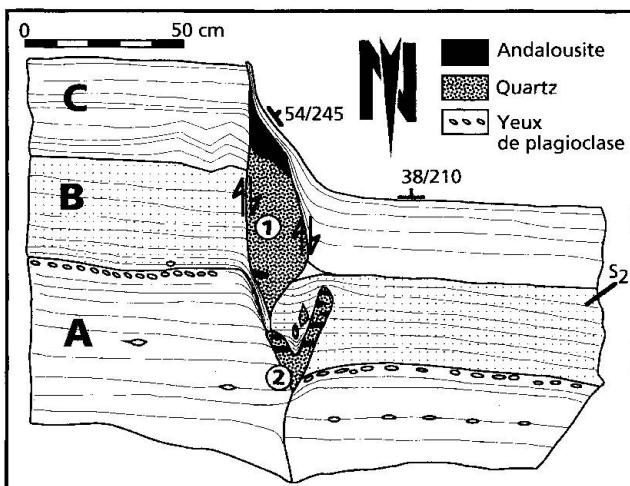


Fig. 4 Veine discordante minéralisée en andalousite, coord. 790.330/187.790 (carte nationale de la Suisse). A = micaschiste à staurolite et porphyroblastes de plagioclase; B = gneiss à plagioclase-muscovite-biotite; compétent par rapport à A; C = micaschiste à nombreuses intercalations centimétriques de quartzite. (1) et (2) voir texte.

#### 3.3.2. Veines discordantes

La veine N° 2 de la figure 4 coupe net la schistosité  $S_2$ ; il s'agit d'une fracture d'extension dans

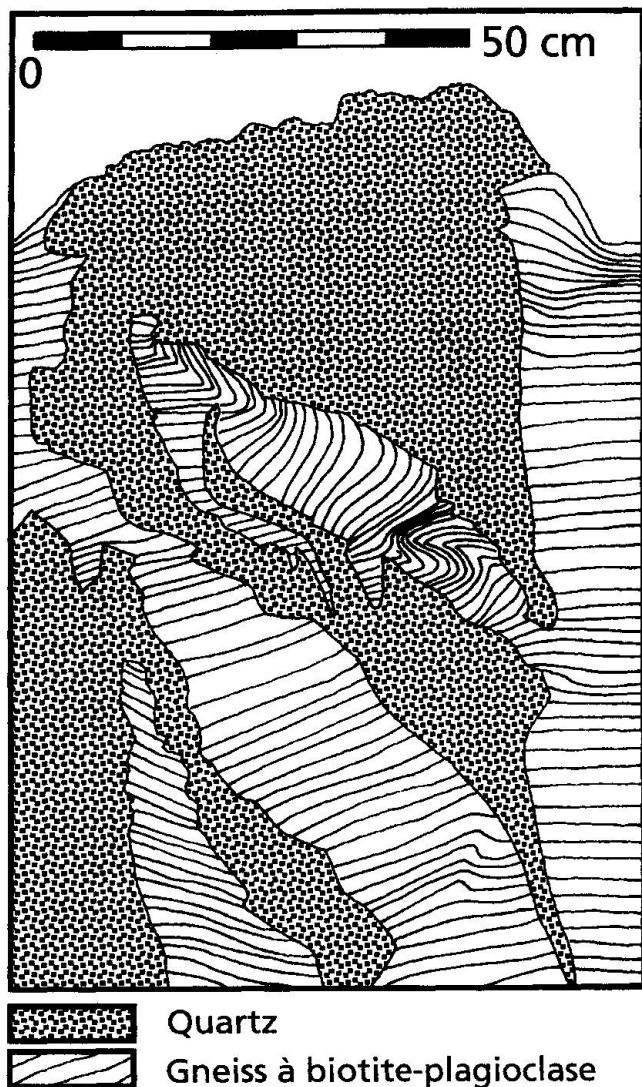


Fig. 6 Veine de quartz discordante par rapport à la schistosité  $S_2$ , contenant des éléments anguleux du schiste encaissant. Coord. 790.430/187.650.

laquelle l'andalousite croît parallèlement à l'ouverture.

La géométrie de la veine N° 1, figure 4 – veine asymétrique, avec une déformation de la schistosité à son contact – se rencontre fréquemment. La figure 5 propose un modèle pour sa mise en place dans un contexte dynamique de cristallisation/déformation.

La veine de la figure 6 est un cas particulier rarement observé aux environs du Pischahorn. Le contact avec le paragneiss est net; les fragments de paragneiss inclus dans la veine sont anguleux, mais présentent une déformation qui n'affecte pas la roche encaissante.

Cette géométrie à la limite des domaines ductiles et cassants peut résulter d'une fracturation assistée par une surpression des fluides (NICOLAS, 1987).

### 3.3.3. Mesures structurales sur les veines

L'axe du boudinage des veines pseudo-concordantes n'a pu être mesuré systématiquement. Dans les quelques cas étudiés en détail cet axe est orienté E–W. Les mesures effectuées sur les veines discordantes (Fig. 7) montrent que ces veines sont typiquement sub-verticales de direction N–S, ce qui indique une extension E–W.

La mesure de l'axe  $c$  des prismes d'andalousite dans les veines où ce minéral présente une orientation préférentielle (Fig. 7) met aussi en évidence un axe E–W.

Les monocristaux d'andalousite montrent souvent une fracturation, le vide créé étant rempli parfois par du mica clair, parfois par du quartz qui ne se distingue pas de celui de la veine. Cette déformation apparaît aussi bien dans les veines concordantes que discordantes. L'axe d'étirement est orienté E–W.

### 3.3.4. Les veines par rapport aux éléments tectoniques

Par rapport au schéma du tableau 1, les veines

1) sont postérieures à la schistosité  $S_2$ .

2) une veine discordante coupe un plis  $F_3$  (coordonnées 790.330/187.790), ce qui indique sans équivoque une mise en place syn- à post- $D_3$ . Parfois, une veine s'insère dans le plan axial d'un pli  $F_3$ . Rarement, une veine de quartz stérile est plissée par  $D_3$ ; nous pouvons alors admettre qu'il s'agit d'une veine relique, formée lors d'un événement antérieur à la mise en place des veines à andalousite.

3) aucun filon déformé par les «shear bands»  $D_4$  n'a été observé, ce qui se comprend facilement car ce type de déformation ne peut affecter un élément aussi compétent qu'une veine.  $D_4$  représentant un événement de basse température (FLISCH, 1987), nous le situons post-veines.

Ces observations placent les veines entre  $D_3$  et  $D_4$ , ce qui est en contradiction avec le modèle proposé par FLISCH (1987) dans lequel les veines étaient considérées comme antérieures à  $D_3$ .

### 3.3.5. Chronologie de la mise en place des veines

L'intervalle durant lequel les veines se sont mises en place est borné par deux datations (tableau 1):  $370 \pm 17$  Ma (pic du métamorphisme varisque) et 330–280 Ma (refroidissement tardif-varisque au-dessous de 350–300 °C). Cet intervalle correspond à un âge carbonifère supérieur.

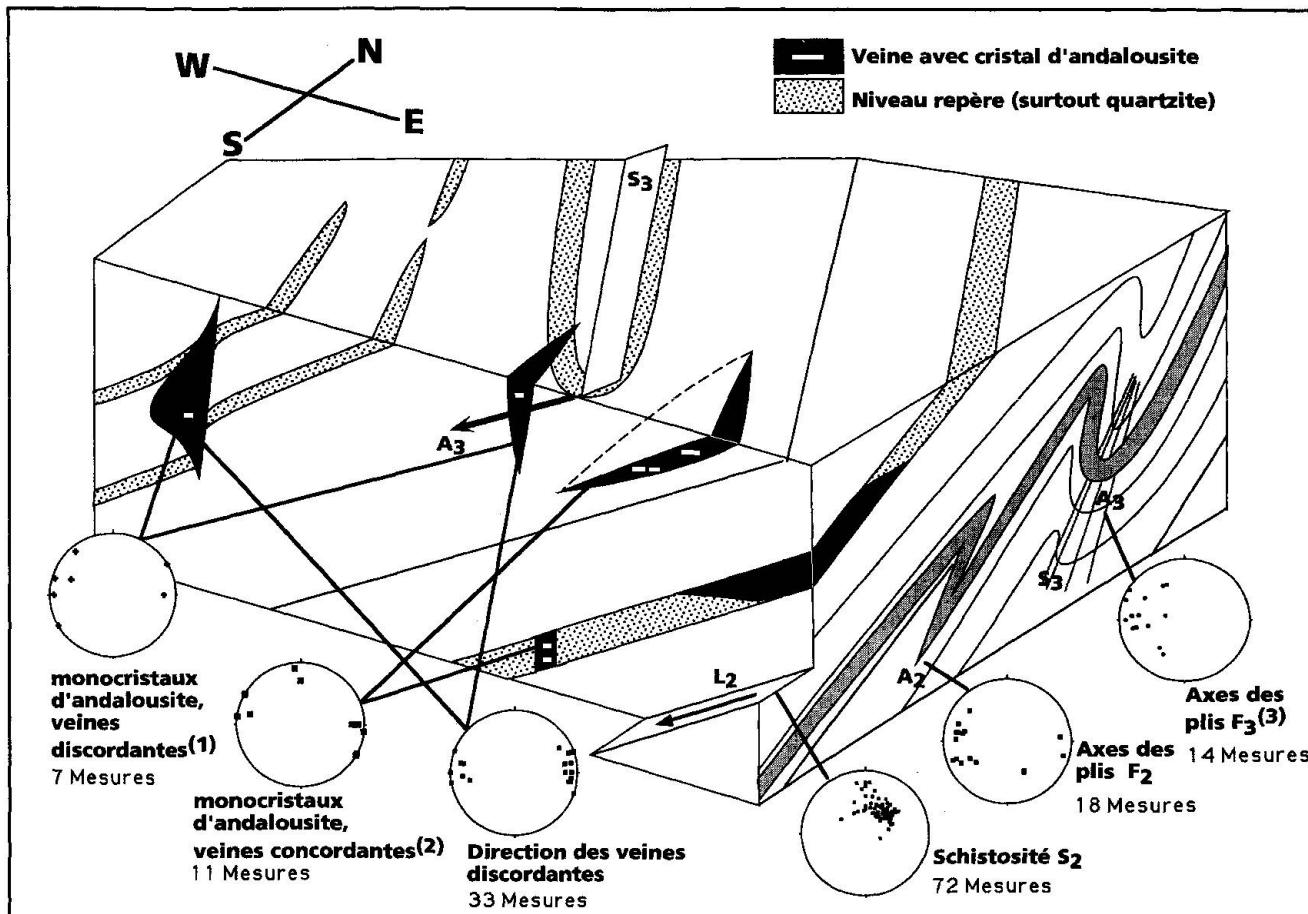


Fig. 7 Position structurale des veines à andalousite sur le Pischahorn. La projection s'effectue sur la demi-sphère inférieure des stéréogrammes.

(1), (2): direction moyenne de l'axe c des cristaux d'andalousite dans les exsudats où ces derniers s'alignent selon une direction préférentielle.

(3): deux types d'axes de pli sont liés à D<sub>3</sub>, le second représentant des plis parasites A<sub>3-b</sub> sur les plis d'axe A<sub>3-a</sub>. Seul A<sub>3-a</sub> est reporté sur ce stéréogramme.

### 3.3.6. Discussion (Fig. 7)

Malgré leur grande diversité géométrique, toutes les veines du Pischahorn sont explicables si l'on fait intervenir une cristallisation syn-déformation. De fait, l'aspect souvent complexe des veines est lié à cette mise en place dans un contexte dynamique.

A l'échelle du Pischahorn, le contexte dynamique relève d'une extension E-W. Sur le Pischahorn, cette direction est très importante pour le cycle varisque, puisqu'elle se manifeste déjà dans la linéation de faciès amphibolite L<sub>2</sub>.

### 4. Origine du fluide et des solutés

Différents arguments soutiennent l'hypothèse d'une production du fluide à partir duquel les

veines crisallissent par des réactions métamorphiques au sein mêmes des paragneiss avoisinants:

– Les veines à andalousite sont étroitement liées aux paragneiss, et en particulier aux micaschistes.

– La chimie de la muscovite grossière des veines est identique à celle de la muscovite de la schistosité S<sub>2</sub> des paragneiss (rappelons que l'événement à andalousite est le dernier événement thermique important; cette identité chimique est donc bien un caractère primaire). Une altération hydrothermale des paragneiss (présence de chlorite et d'ilménite) ne s'observe que rarement, au contact immédiat des veines ( $\leq 1$  dm). La teneur en fluor de la muscovite, dont une valeur anormale pourrait traduire l'influence d'un fluide lointain (CESARE, 1992), est faible tant dans le gneiss que dans les veines.

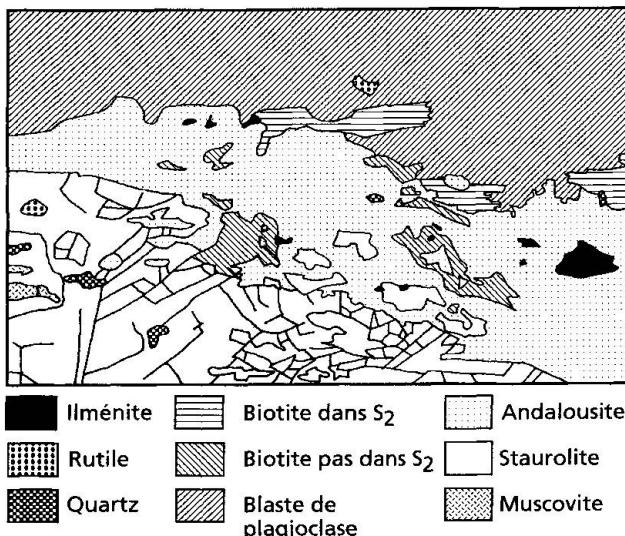
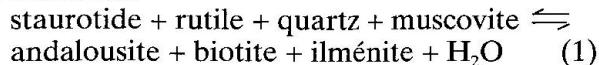


Fig. 8 Dessin de la lame mince JB 60 (micaschiste à staurotide, coord. 790.335/187.920; coupe perpendiculaire à la schistosité  $S_2$  et parallèle à la linéation  $L_2$ , champ de vision 2 mm), montrant une réaction de déshydratation de la staurotide.

– Aucune intrusion contemporaine de la cristallisation des veines à andalousite n'est connue dans la nappe de la Silvretta. Les seules roches magmatiques non affectées par la déformation  $D_2$  apparaissent après le refroidissement du socle de la nappe de la Silvretta: il s'agit des rhyolites permotriassiques de la Ducan-Mulde (couverture para-autochtone de la nappe de la Silvretta; GRAF, 1987) et des nombreux dikes de diabases affleurants sur toute la surface de la nappe (HELLERMAN, 1992). Ces derniers sont intrudés vraisemblablement au Permien dans un socle refroidi (bord de trempe); ils ne portent aucune déformation anté-alpine.

L'étude microscopique des paragneiss a confirmé cette hypothèse. Hors des veines, l'andalousite est un hôte rare des paragneiss (FLISCH, 1987). Elle ne se trouve que dans les micaschistes, toujours associée à la staurotide; habituellement elle encroûte cette dernière (Fig. 8). Parfois seules quelques reliques de staurotide sont conservées dans un blaste d'andalousite; d'autres fois encore l'andalousite imprègne un niveau à biotite au contact d'un niveau à staurotide. L'andalousite est associée à l'ilménite (alors que le rutile est la phase à titane visible dans la staurotide); on remarque parfois une néoformation de biotite qui ne repose pas dans  $S_2$  (Fig. 8).

Ces textures résultent d'une réaction de déshydratation de la staurotide que l'on peut écrire globalement:



Il s'agit d'une variante de la réaction

$$\text{staurotide} + \text{muscovite} + \text{quartz} \rightleftharpoons \text{andalousite} + \text{biotite} + \text{H}_2\text{O} \quad (2)$$

de HOSCHEK (1969), déjà évoquée par FLISCH (1987).

Un calcul simple montre qu'une telle réaction suffit amplement à produire l'aluminium nécessaire à la cristallisation de l'andalousite des veines à partir du stock de staurotide disponible. Le silicium et les alcalins sont introduits dans le fluide lors du rééquilibrage de ce dernier avec la minéralogie des gneiss (quartz-muscovite-plagioclase).

Une modélisation précise reste à entreprendre pour décrire le processus de précipitation des minéraux dans les veines. Cependant, on peut remarquer que les deux grands groupes paragénétiques (quartz + andalousite [A et C dans le tableau II], quartz + andalousite + muscovite grossière [B dans tableau II]) sont liés à une position structurale différente qui traduit un processus différent d'ouverture de l'espace dans lequel cristallisent les minéraux (gradients de pressions, vitesses de drainage et de précipitation diffèrent donc).

## 5. Conséquences pour l'évolution tardivoisique de la nappe de la Silvretta

Les observations sur les veines à andalousite du Pischahorn modifient la portion tardivoisique du schéma d'évolution de la nappe de la Silvretta dans le diagramme P-T proposé par FLISCH (1987; Fig. 9). La présence d'une veine coupant un pli  $F_3$  amène à considérer  $D_3$  non comme une anomalie de pression à la sortie du champ de l'andalousite (FLISCH, 1987), mais comme un stade intermédiaire au cours de la décompression qui suit le pic du métamorphisme varisque et conduit le socle de la nappe de la Silvretta dans le champ de stabilité de l'andalousite.

La pénétration dans le champ de l'andalousite peut s'effectuer par décompression simple ou être associée à une anomalie thermique (Fig. 9). Une semblable anomalie thermique à la fin du cycle varisque n'est pas exceptionnelle dans les Alpes. Des chemins P-T similaires ont par exemple été décrits récemment dans le socle briançonnais (THÉLIN et al. [1993]: fenêtre métamorphique du Mont Mort, nappe des Pontis, où on trouve des cristaux d'andalousite très semblables à ceux de Pischahorn; DESMONS [1992]).

La forte prédominance de l'andalousite dans les veines, la reconnaissance d'une réaction dis-thène  $\rightarrow$  andalousite et les premiers calculs thermodynamiques sur la déshydratation de la staurotide nous incitent à préférer l'hypothèse d'une anomalie thermique.

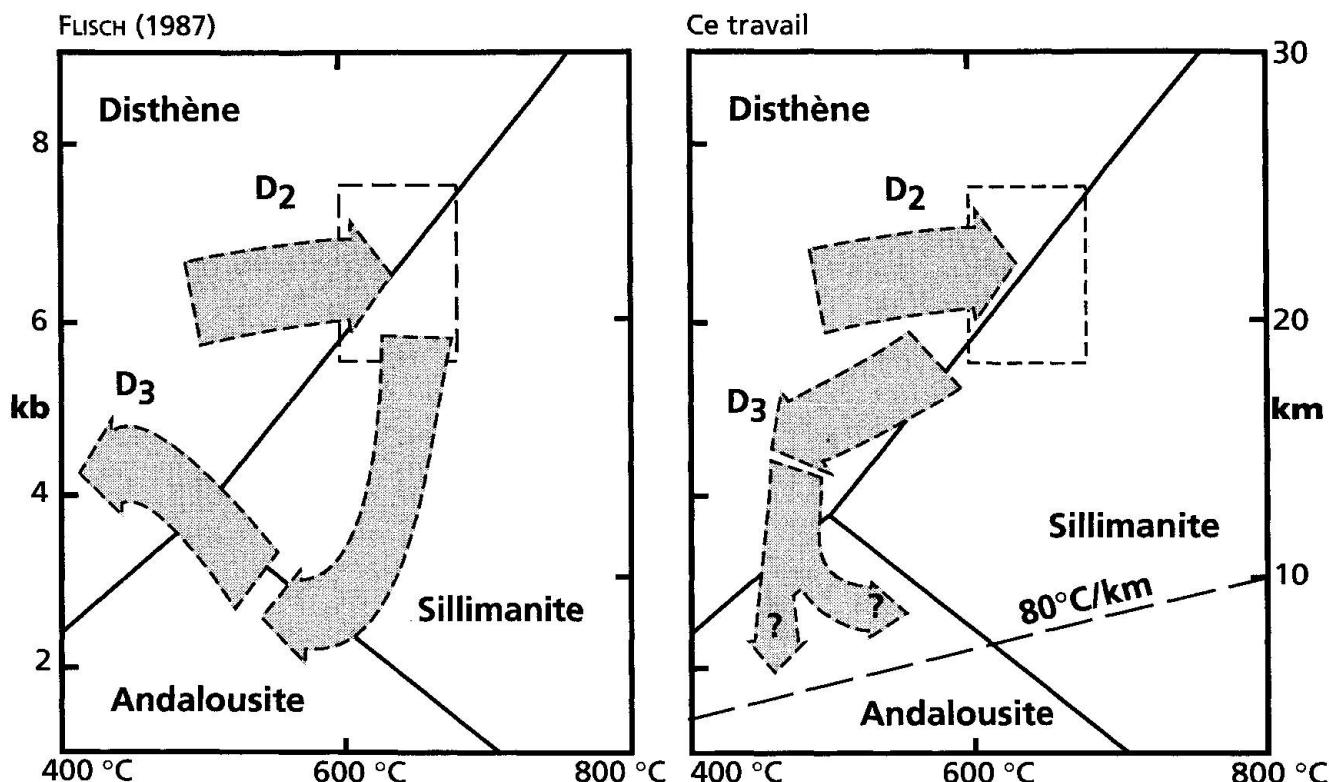


Fig. 9 Chemin pression-température varisque à tardivarisque suivi par les micaschistes de la nappe de la Silvretta. A gauche version originale de FLISCH (1987) et à droite version modifiée pour tenir compte des résultats de cette étude.

Seule une étude plus poussée permettra de fixer l'allure de l'évolution Pression-Température tardivariisque du socle de la nappe de la Silvretta. Cette information est vitale pour l'interprétation du contexte géodynamique qui prévalut à ce moment (BENCIOLINI, à paraître), ainsi que pour la corrélation du socle de la nappe de la Silvretta avec les autres lambeaux de socle varisque des Alpes.

#### Remerciements

Ce travail de diplôme a été dirigé par M. Maggetti qui s'est montré toujours attentif et enthousiaste. Je remercie ce dernier ainsi que G. Biino, J. von Raumer et L. Benciolini pour la discussion critique du manuscrit. L'utilisation de la microsonde électronique de l'Université de Berne aurait été impossible sans le soutien du Fond National Suisse (crédit 21-26579.89) et les conseils avisés de L. Diamond. Merci enfin à P. Thélin qui effectua la lecture critique du manuscrit.

#### Références

- BOLLIN, R. (1993): Die Knotengneise der Silvretta. Thèse non-publiée, université de Fribourg-Suisse.  
 BRUGGER, J. (1992): Géologie et Pétrographie du Pischa horn (Grisons), avec un intérêt particulier pour les minéralisations à andalousite. Diplôme non-publié, Université de Fribourg-Suisse.  
 CESARE, B. (1992): Metamorfismo di contatto di rocce pelitiche nell'aureola di Vedrette di Ries (Alpi Orientali, Italia). Thèse Université de Padova-Italie.  
 DESMONS, J. (1992): The Briançon basement (Pennine Western Alps): Mineral composition and polymetamorphic evolution. Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt. 72, 37-55.  
 FLISCH, M. (1987): Teil 1: Geologische, petrographische und isotopengeologische Untersuchungen an Gesteinen des Silvrettakristallins. Teil 2: Die Hebungsgeschichte der oberostalpinen Silvretta-Decke seit der mittleren Kreide. Thèse non-publiée, Université de Berne-Suisse.  
 GRAF, K. (1987): Geologische Untersuchungen der Sedimente und Vulkanite der Landwasserkette zwischen Valbellahorn und Wiesen (Graubünden). Diplôme non-publié, Université de Berne-Suisse.  
 GRAMMAN, A. (1899): Über die Andalusitvorkommen im rhätischen Flüela- und Scalettagebiet und die Färbung der alpinen Andalusite. Diss. Zürich, Vier-Jahrschr. Natf. Ges. Zürich, Jg. XLIV.  
 HELLERMAN, B.E. (1992): Petrographic, geochemical and isotopic studies of diabase dikes of the Swiss Silvretta nappe. Thèse non-publiée, Université de Fribourg-Suisse.  
 HOLDAWAY, M.J., DUTROW, B.L. et HINTON, R.W. (1988): Devonian and Carboniferous metamorphism in west-central Maine: The muscovite-almandine geobarometer and staurolite problem revisited. Amer. Mineral. 73, 20-47.

- HOSCHEK, G. (1969): The stability of staurolite and chloritoid and their significance in metamorphism of pelitic rocks. *Contr. Mineral. Petrol.* 22, 208–232.
- KELLER, F. (1968): Mineralparagenesen und Geologie der Campo-Tencio/Pizzo-Forno-Gebirgsgruppe. *Beitr. Geol. Karte Schweiz*, N.F., 135, 168 p.
- KERRICK, D.M. (1990): The  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$  polymorphs. *Reviews in Mineralogy* 22, Mineralogical Society of America, 405 p.
- MAGGETTI, M. (1986): Petrographische Kriterien zur Altersstellung des Hochdruckereignisses in der Silvrettamasse. *Fortschr. Miner.* 64, Beiheft 1, p. 103.
- MAGGETTI, M., FLISCH, M. et BOLLIN, R. (1990): Bericht über die Exkursion der Schweiz. Mineralogischen und Petrographischen Gesellschaft ins Silvretta-Kristallin und in den Westrand des Unterengadiner Fensters (11.–14. September 1989). *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.* 70, 121–157.
- MAGGETTI, M. et FLISCH, M. (1993): Evolution of the Silvretta nappe. In: J. VON RAUMER et F. NEUBAUER (eds): *The pre-mesozoic geology in the Alps*. Springer Verlag, 469–484.
- MICHAEL, G. (1985): Geologie und Petrographie im Maccun (Unterengadin). *Diplôme non-publié*, Université de Fribourg-Suisse.
- MILLER, J. (1988): Cathodoluminescence microscopy. In: M. TUCKER (ed.): *Techniques in Sedimentology*. Oxford, Blackwell Scientific Publication, 174–190.
- NICOLAS, A. (1987): *Principles of rock deformation*. – Dordrecht-Boston-Lancaster-Tokyo, D. Reidel Publishing Company.
- NOVACK, M. et SREIN, V. (1989): Chemical composition and paragenesis of wolframite from the Dolní Bory pegmatites, western Moravia, Czechoslovakia. *Acta Universitate Carolinae*.
- PLATT, J.P. et VISSERS, M.L.M. (1980): Extentional structures in anisotropic rocks. *J. of Struct. Geol.* 2, 4, 397–410.
- RAMBERG, H. (1956): Pegmatites in West Greenland. *Bull. Geol. Soc. America* 67, 185–214.
- RAMSAY (1967): *Folding and fracturing of rocks. International series in the Earth and Planetary sciences*. New York, McGraw Hill.
- SPAENHAUER, F. (1933): Die Andalusit- und Disthenvorkommen der Silvretta. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.* 13, 323–346.
- STRECKEISEN, A. (1928): *Geologie und Petrographie der Flüelagruppe*. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.* 8, 87–239.
- THÉLIN, Ph., SARTORI, M., BURRI, M., GOUFFON, Y. et CHESSEX, R. (1993): The pre-mesozoic basement of the Briançonnais (Wallis, Switzerland). In: VON RAUMER, J. et NEUBAUER, F. (eds): *The pre-mesozoic geology in the Alps*. Springer Verlag, 297–315.
- VON DER CRONE, M. (1989): Fleckengesteine der Silvretta: Relikte einer vorvariszischen (panafrikanischen?) Metamorphose. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.* 69, 141–144.

Manuscrit reçu le 25 juillet 1993; manuscrit révisé accepté le 9 mars 1994.