

LA DILATATION THERMIQUE DES FELDSPATHS

par

H. SAUCIER et A. SAPLEVITCH

(Laboratoire de Minéralogie de la Faculté
des Sciences de Strasbourg)

Abstract

The only feldspar for which we know accurately the orientation of the ellipsoid of thermal expansion and the values of the principal expansion coefficients, is orthoclase.

In plagioclases a large rotation of the ellipsoid occurs when the temperature rises. The volume expansion, large for orthoclase and albite, is smaller for calcic feldspars.

Research still in progress shows, that many orthoclases sharply expand at 580°–600 °C. This is ascribed to the release of stresses generally present in perthites. These stresses arise from the discrepancy between cell-dimensions in albite and orthoclase.

No such change occurs among peristerites.

A new method for the determination of the ellipsoid of thermal expansion in feldspars is proposed. Use is made of the crackling varnishes (verniss craquelants), photoelastic varnishes, and strain gauges.

The method was first applied to an adularia of Switzerland.

Introduction

Etant donnée la masse énorme de publications parues récemment sur les feldspaths, il est curieux de constater qu'aucune n'est relative à leur dilatation thermique. Il s'agit pourtant d'une propriété physique importante susceptible de nous renseigner sur les liaisons à l'intérieur du cristal, et qui fournit en outre un moyen commode pour l'étude de certaines transformations thermiques.

Dans cet article nous passerons en revue les différents travaux parus anciennement, puis nous donnerons quelques indications sur les recherches actuellement en cours à Strasbourg [1].

[1] Nous utiliserons les notations suivantes: α est la dilatation thermique linéaire. Les coefficients principaux sont désignés par $\alpha_1 > \alpha_2 > \alpha_3$. Le coefficient de dilatation cubique est $\beta = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$. Les indices de réfraction principaux sont $n_1 > n_2 > n_3$.

1ère partie — travaux antérieurs

Travaux de Kopp

Les premières mesures publiées sur la dilatation thermique des feldspaths sont celles de Kopp (1852) obtenues en plongeant le cristal dans un pycnomètre rempli de liquide et porté à différentes températures. Il trouve pour le coefficient de dilatation cubique de l'*orthose* $\beta = 26 \cdot 10^{-6}$ dans l'eau et $\beta = 17 \cdot 10^{-6}$ dans le mercure. Les intervalles de température ne sont pas précisés.

Dans l'article de ce précurseur, où figurent des données relatives à un assez grand nombre d'espèces cristallisées, l'auteur remarque fort judicieusement que le coefficient de dilatation thermique ne dépend pas seulement de la composition chimique, mais aussi de la disposition des atomes. Il n'aborde pas le problème de l'anisotropie de la dilatation thermique.

Cette anisotropie avait déjà été mise en évidence, dans le cas de la calcite, par Mitscherlich (1824). Mais c'est Fizeau (1868) qui le premier publia des données complètes sur la dilatation thermique d'un feldspath.

Travaux de Fizeau

Utilisant sur l'*adulaire* du St-Gothard la méthode interférométrique qu'il venait d'imaginer, il put déterminer les coefficients de dilatation linéaire, et placer dans le cristal les axes principaux des dilatations thermiques.

Comme il était à prévoir, un de ces axes coïncide avec l'axe binaire du cristal, c'est le petit axe α_3 . Les 2 autres axes sont contenus dans le plan de symétrie. La figure 1 donne leur disposition. L'angle que fait le grand axe α_1 avec $[100]$ a pour valeur $\omega = 18^\circ 48'$.

Les valeurs des dilatations principales sont les suivantes :

$$\alpha_1 = 19,07 \cdot 10^{-6}$$

$$\alpha_2 = -1,48 \cdot 10^{-6}$$

$$\alpha_3 = -2,00 \cdot 10^{-6}$$

Ce qui donne pour la dilatation cubique

$$\beta = 15,59 \cdot 10^{-6}$$

valeur plus faible que celles trouvées par Kopp. Les mesures étaient effectuées entre la température ambiante et 70° .

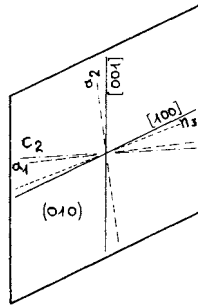


Figure 1. Disposition des axes principaux de dilatation thermique α_1 et α_2 dans le plan (010). n_3 est le petit axe de l'indicatrice optique. C_2 est un des axes des conductibilités thermiques.

Adulaire du St-Gothard (d'après Fizeau).

Fizeau note que le coefficient de dilatation augmente avec la température. Si on exprime la longueur l en fonction de la température t par l'équation

$$l = l_0(1 + at + bt^2)$$

on trouve dans la direction de l'axe binaire

$$b = 0,78 \cdot 10^{-8}$$

Un résultat remarquable de cette étude c'est que les axes principaux des dilatations thermiques ont une orientation nettement différente de celle des axes de l'ellipsoïde des indices de réfraction (la direction n_3 correspondant au petit indice de réfraction est portée sur la figure 1).

Situé dans le plan de symétrie n_3 fait un angle de $14^\circ 18'$ avec α_1 ; par contre l'écart entre α_1 et l'axe C_2 des conductibilités thermiques n'est que de $3^\circ 19'$.

Travaux de Beckenkamp

Un peu plus tard, Beckenkamp (1881), qui ne paraît pas avoir eu connaissance des travaux de Fizeau, entreprend une étude sur la dilatation thermique des cristaux monocliniques et tricliniques; il mesure, suivant l'idée de Mitscherlich, les angles entre les faces d'un cristal à différentes températures et en déduit la position de l'ellipsoïde des dilatations [2]. Pour l'*adulaire*, il trouve comme Fizeau que la

[2] Il est utile de rappeler que l'*ellipsoïde des dilatations* dont il est question ici n'est pas la quadrique représentative du tenseur des dilatations. Celle-ci dont l'équa-

dilatation maxima est voisine de [100], la dilatation la plus faible se faisant suivant [010] (c'est-à-dire l'axe binaire). L'angle ω que fait l'axe α_1 avec [100] est de $19^\circ 56'$, valeur peu différente de celle trouvée par Fizeau. Les 3 coefficients principaux de dilatation sont déterminés en prenant pour la dilatation cubique la moyenne des mesures de Kopp

$$\alpha_1 = 14,6 \cdot 10^{-6}$$

$$\alpha_2 = 5,2 \cdot 10^{-6}$$

$$\alpha_3 = 1,6 \cdot 10^{-6}$$

ceci pour l'intervalle de température 20° – 80° . Les valeurs ainsi calculées sont naturellement fortement différentes de celles trouvées par Fizeau.

Beckenkamp a abordé aussi le problème difficile de la dilatation thermique des feldspaths tricliniques. Ses mesures ont porté sur un cristal d'*anorthite* du Vésuve. A partir des angles dièdres mesurés, il calcule l'angle des axes cristallographiques à différentes températures, entre 20° et 200° , ainsi que les rapports des paramètres $\frac{a}{b}$ et $\frac{c}{b}$. Un calcul pénible, effectué suivant la méthode proposée par C. Neumann (1861), et dans lequel on néglige les termes du second ordre, lui permet de placer les axes de l'ellipsoïde des dilatations thermiques. On trouvera reportés sur une projection stéréographique ses résultats (Fig. 2). L'axe de dilatation maxima α_1 est voisin du plan (010). L'axe α_3 est voisin de [001]. L'axe α_2 est naturellement perpendiculaire aux 2 premiers.

Si on compare la position de l'ellipsoïde des dilatations dans l'*anorthite* et dans l'*orthose*, on constate que dans les deux cas la dilatation maxima se fait pour une direction voisine de [100], mais par contre les directions α_2 et α_3 sont inversées.

Pour calculer les valeurs numériques de $\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3$ Beckenkamp suppose de façon arbitraire que le coefficient de dilatation cubique est le même pour l'*anorthite* que pour l'*orthose*. Il serait sans intérêt de donner les valeurs ainsi obtenues. Il nous suffira de dire que les

tion est $\alpha_{ij}x_ix_j = 1$ peut être soit un ellipsoïde, soit un hyperboloïde; car les coefficients de dilatation ne sont pas nécessairement positifs.

Par contre, si nous considérons une sphère de rayon 1 inscrite dans le cristal, au cours d'un échauffement ΔT elle devient nécessairement un ellipsoïde dont les demi axes ont pour valeur $(1 + \alpha_1 \Delta T)$, $(1 + \alpha_2 \Delta T)$, $(1 + \alpha_3 \Delta T)$. C'est l'ellipsoïde des dilatations.

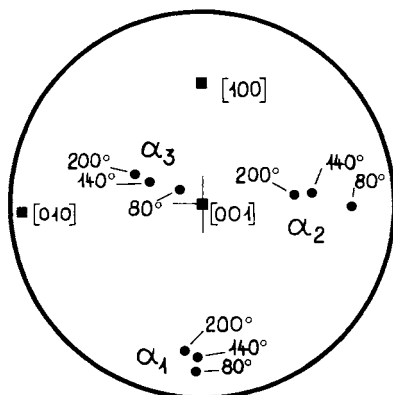


Figure 2. Projection stéréographique indiquant la position des axes α_1 α_2 α_3 de dilatation thermique pour différentes températures dans l'anorthite du Vésuve (d'après Beckenkamp). Plan de projection perpendiculaire à $[001]$.

différences α_1 - α_2 et α_2 - α_3 ont à peu près même valeur. Un résultat à noter pour l'anorthite c'est la rotation au cours de l'élévation de température de l'ellipsoïde des dilatations qui n'est astreint à aucune condition résultant de la symétrie du cristal.

Dans le cas de l'orthose, un des axes de l'ellipsoïde restant confondu avec l'axe binaire, on aurait pu s'attendre à une rotation de l'ellipsoïde autour de cet axe. Mais dans le domaine étudié par Beckenkamp (20° - 200°), il semble que cet ellipsoïde reste fixe.

Travaux d'Offret

Dans un long mémoire consacré aux variations des indices de réfraction sous l'influence de la chaleur, Offret (1890) étudie incidemment la dilatation thermique d'une sanidine et d'un oligoclase. Il observe la variation au chauffage de l'angle des prismes qu'il a taillés pour son étude optique.

Dans la *sanidine*, la dilatation maxima se fait pour une direction voisine de $[100]$, tandis que α_3 est dirigé suivant l'axe binaire, ce qui est conforme aux observations de Fizeau et de Beckenkamp. En ce qui concerne les valeurs relatives des dilatations, tandis que Fizeau trouve α_2 voisin de α_3 , Offret trouve α_1 et α_2 presque égaux; il attribue cette différence au fait que ses mesures ont porté sur une sanidine, tandis que Fizeau opérait sur une adulaire.

Offret est le premier à donner des résultats pour un plagioclase acide. Il a examiné un *oligoclase* de Backersville (Caroline du Nord).

Ayant taillé des prismes parallèles à $n_1 n_2 n_3$, il observe la dilatation la plus grande suivant n_3 et la plus faible suivant n_2 . Mais il ne détermine pas l'orientation exacte de l'ellipsoïde des dilatations.

De ses observations on peut néanmoins conclure que l'axe α_1 est voisin de [100] comme pour l'orthose et l'anorthite. D'autre part l'axe moyen est voisin de [010] comme Beckenkamp l'avait trouvé pour l'anorthite. On notera enfin que α_2 est plus voisin de α_3 que de α_1 , ceci en valeur relative car Offret n'a pas mesuré leurs valeurs absolues.

Travaux de Rinne

En 1914 Rinne étudie en fonction de la température les variations de l'angle des clivages (001) et (010) des *plagioclases*, dans un domaine de -170° à $+600^\circ$; il observe que les variations vont en diminuant de l'albite à l'anorthite. En outre la courbe donnant l'angle en fonction de la température, présente dans le cas de l'anorthite un maximum aplati entre 0 et 200° .

Travaux de Kozu et alii

Dans leur étude sur la dilatation thermique des feldspaths alcalins, Kozu et Saiki (1925) ne se sont pas proposés de déterminer l'ellipsoïde des dilatations, mais plutôt d'étudier les transformations apparaissant dans les feldspaths au cours d'un chauffage allant jusqu'à 1100° .

Ils ont utilisé à cet effet un dilatomètre dérivé du dilatomètre différentiel Chevenard.

Pour une *adulaire* du St-Gothard, on peut calculer d'après leurs résultats entre 20° et 200° suivant l'axe [010] un coefficient

$$\alpha_2 = +0,95 \cdot 10^{-6}$$

faiblement positif, là où Fizeau trouve une valeur négative $-1,5 \cdot 10^{-6}$.
Suivant l'axe [100]

$$\alpha_1 = 17,8 \cdot 10^{-6}$$

et perpendiculairement à (001)

$$\alpha = 0,22 \cdot 10^{-6}$$

Il semblerait donc que dans ce cas l'axe α_3 soit contenu dans le plan (010).

Dans l'ensemble de leurs mesures qui ont porté sur des échantillons d'adulaire, de pierre de lune, d'amazonite et de perthite, ils observent un crochet à 180° – 200° peu net, à 475° – 500° une augmentation de volume nette est interprétée par eux comme provenant de la dissolution d'une solution solide riche en feldspath sodique dans une autre riche en feldspath potassique.

A 700° et 900° un crochet apparaît dans tous les feldspaths examinés, mais ce peut être une dilatation ou une contraction.

Au-dessus de 1000° une accélération de la dilatation se marque sur certaines courbes, elle paraît correspondre à une augmentation de volume permanente.

Dans de nouvelles recherches japonaises, Kozu et Ueda (1933) déterminent les dilatations de six plagioclases dans trois directions perpendiculaires, ce qui leur permet de calculer la dilatation cubique; sur la figure 3 extraite de leur mémoire, on voit qu'elle est nettement plus importante pour les plagioclases sodiques.

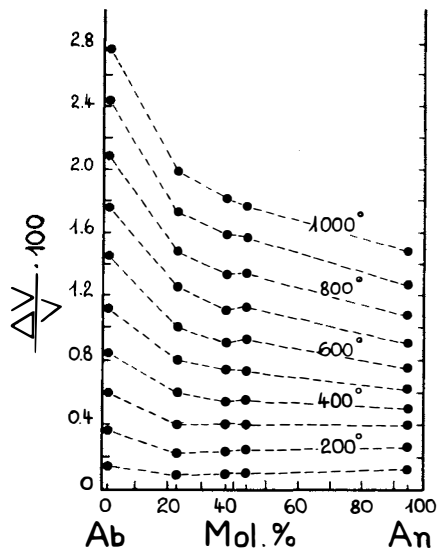


Figure 3. Dilatation cubique des plagioclases, en fonction de leur composition chimique (d'après Kozu et Ueda).

Travaux de Rosenholtz et Smith

Rosenholtz et Smith (1941) ont mesuré la dilatation thermique de l'*adulaire* à l'aide d'un dilatomètre de leur invention; dans cet appareil, la dilatation de l'échantillon provoque le déplacement d'un diaphragme fermant une chambre remplie de mercure. On observe le déplacement du mercure dans un tube capillaire.

Entre 0° et 200° les résultats sont les suivants :

parallèlement à	[100]	$\alpha = 16,63 \cdot 10^{-6}$
	[010]	$\alpha = 0,27 \cdot 10^{-6}$
	[001]	$\alpha = 0,46 \cdot 10^{-6}$

Ces résultats comme ceux de Fizeau et Kozu indiquent une dilatation maxima suivant une direction voisine de [100]. Mais les valeurs trouvées ne sont pas en bon accord avec celles trouvées par leurs prédécesseurs.

Les mesures poursuivies jusqu'à 1000° ont montré une variation quasi linéaire suivant [100] et [001]. Par contre suivant [010] la dilatation très faible est d'abord positive puis négative. Rosenholtz et Smith font état de nombreux changements brusques dans la vitesse de dilatation, ils en comptent douze entre 120° et 950°. D'autre part, ils observent dans certains cas une déformation permanente. La transformation observée à 900° correspondrait à la transformation de l'*adulaire* en *sanidine*. La diffusion de la soude dans le feldspath potassique serait la cause des autres crochets observés.

Dans un second article Rosenholtz et Smith (1942) donnent des valeurs relatives au *microcline*.

De 0° à 200°

parallèlement à	[100]	$\alpha = 16,19 \cdot 10^{-6}$
	[010]	$\alpha = 0,23 \cdot 10^{-6}$
	[001]	$\alpha = 0,45 \cdot 10^{-6}$

valeurs très voisines de celles qu'ils avaient obtenues pour l'*adulaire*.

A température élevée, on constate que la valeur des coefficients de dilatation augmente pour le *microcline* tandis que pour l'*adulaire* elle s'abaisse. Vingt changements de volume brusques sont signalés entre 0° et 1000°.

**Résumé de données sélectionnées
sur la dilatation thermique des feldspaths**

Adulaire — (*Fizeau*)

$$\begin{array}{ll} \alpha_1 = 19,07 \cdot 10^{-6} & \text{domaine de température} \\ \alpha_2 = -1,48 \cdot 10^{-6} & 15^\circ - 70^\circ \text{ environ} \\ \alpha_3 = -2,00 \cdot 10^{-6} & \end{array}$$

α_1 et α_2 sont contenus dans (010). α_1 est situé dans l'angle obtus de \vec{a} et \vec{c} et fait un angle $\omega = 18^\circ 48'$ avec \vec{a} . α_3 est parallèle à \vec{b} .

Sanidine — (*Offret*)

Probablement même orientation de l'ellipsoïde que dans l'adulaire, mais α_1 voisin de α_2 .

Microcline — (*Rosenholtz et Smith*)

Valeur moyenne du coefficient de dilatation linéaire

	entre 0° et 200°	entre 0° et 800°
\vec{a}	$16,19 \cdot 10^{-6}$	$17,09 \cdot 10^{-6}$
\vec{b}	$0,23 \cdot 10^{-6}$	$0,18 \cdot 10^{-6}$
\vec{c}	$0,45 \cdot 10^{-6}$	$1,22 \cdot 10^{-6}$

Dilatation linéaire des plagioclases

(d'après Kozu et Ueda)

(les directions données sont approximatives)

	valeur moyenne $\times 10^6$ entre 20° et 200°			valeur moyenne $\times 10^6$ entre 20° et 800°		
	$\alpha // a$	$\alpha \perp (010)$	$\alpha \perp (001)$	$\alpha // a$	$\alpha \perp (010)$	$\alpha \perp (001)$
Ab ₉₉ An ₁	12	3,3	4,4	17	5,5	6,0
Ab ₇₇ An ₂₃	6,7	2,2	3,9	9,2	4,0	5,7
Ab ₆₂ An ₃₈	4,4	3,9	5,0	5,5	5,0	6,5
Ab ₅₆ An ₄₄	6,1	3,9	3,3	8,8	4,2	3,8
Ab ₅ An ₉₅	7,8	2,2	8,3	5,9	2,4	5,8

2 me partie — Travaux en cours

Vu l'insuffisance des données publiées sur la dilatation thermique des feldspaths, nous avons entrepris à Strasbourg de reprendre cette question. Des travaux sont en cours actuellement.

Le premier point sur lequel nous avons porté notre attention c'est l'existence signalée par Kozu et Saiki, puis par Rosenholtz et Smith, de nombreux crochets dans les courbes de dilatation des feldspaths alcalins. Nous avons employé un dilatomètre Chévenard. Cet appareil permet encore de faire des mesures utilisables avec des éprouvettes ne dépassant pas 4 mm de longueur.

Observations sur les perthites

Nous avons ainsi étudié des orthoses perthitiques provenant de différents gisements des Vosges et de la Forêt Noire. Pour beaucoup, une augmentation de volume importante se produit à 580°-600° (voir par exemple fig. 4); on trouve en outre pour certaines, une nouvelle augmentation de volume à des températures variables: 700°-830°-900°.

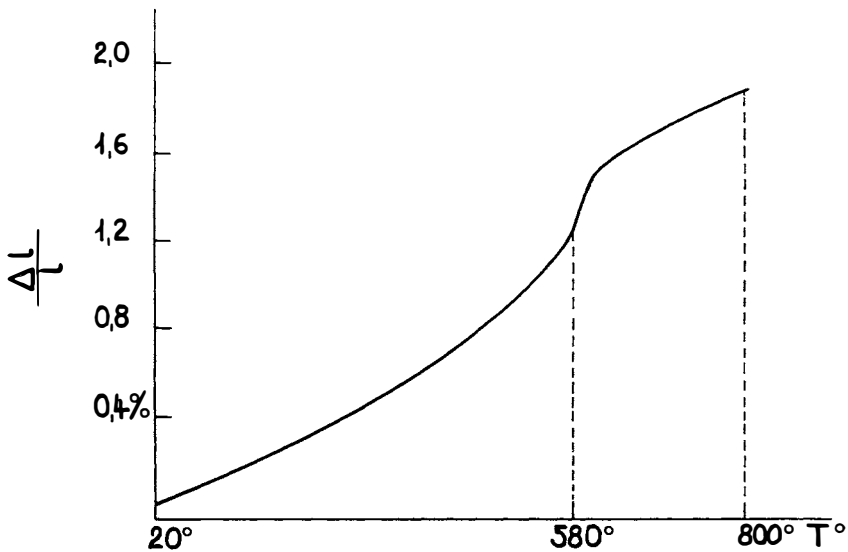


Figure 4. Courbe de dilatation thermique suivant [100] d'une orthose perthitique d'Andlau — Vosges — France.

Il est normal de mettre ces crochets en relation avec l'homogénéisation de la perthite; c'est ce qu'ont fait les auteurs précédents. Il est d'autant plus naturel de le faire que la température de 580° – 600° observée pour ces crochets est en accord assez satisfaisant avec les températures d'homogénéisation qu'on trouve sur le diagramme de Tuttle et Bowen (1952); nos perthites ayant une teneur de 24 à 29% d'albite, la température d'homogénéisation, d'après ces auteurs, devrait être de 500° à 580° .

Mais il convient de tenir compte de plusieurs faits:

1) au cours d'une mesure dilatométrique l'échantillon est chauffé de 20° à 800° ou 900° , avec une vitesse d'échauffement de 150° par heure. Il ne semble pas que dans ces conditions la perthite ait le temps de s'homogénéiser. C'est ainsi que Sonti Lakshmi Narayana Rao (1959) estime nécessaire un chauffage à 1025° , effectué à sec pendant 96 heures pour amener l'homogénéisation dans un mélange microcline-albite de basse température, finement broyé, cette homogénéisation n'étant d'ailleurs réalisée que pour des compositions contenant moins de 30% d'albite.

De même nous avons chauffé une lame de perthite pendant 3 heures à 1020° sans constater la disparition des bandes d'albite dont les bords paraissaient cependant un peu flous.

2) la brusque augmentation de volume observée au cours du chauffage est irréversible. Il ne se produit pas de contraction correspondante au refroidissement. Une nouvelle chauffe effectuée avec le même échantillon ne montre plus aucun accident (ou parfois un crochet très peu marqué, vers 600°).

Il semble donc raisonnable de faire intervenir dans notre explication la libération des contraintes qui doivent exister au contact des lamelles d'albite et d'orthose, et sur lesquelles J. V. Smith (1961) nous donne des précisions: lorsqu'on passe de l'albite à l'orthose le paramètre a augmente de 5,1%, b de 1,2% et c de 0,9%, le volume V de la maille augmentant de 8,1%.

Lorsqu'une perthite se forme par démixtion, des tensions vont se produire à la limite du cristal d'albite néoformé. Il va tendre à se limiter par le plan réticulaire pour lequel les mailles planes correspondant à l'orthose et à l'albite sont aussi peu différentes que possible. On constate que c'est le plan $(\bar{6}01)$.

Soit s et s' les surfaces des mailles élémentaires correspondant à l'orthose et à l'albite dans le plan $(\bar{6}01)$, elles ont des valeurs voisines

$s \neq s'$. Considérons maintenant des mailles tridimensionnelles construites en prenant pour base le plan $(\bar{6}01)$. On a

$$V = s \cdot d_{(\bar{6}01)}$$

$$V' = s' \cdot d'_{(\bar{6}01)}$$

Pour l'orthose le volume V doit dépasser le volume V' de 8,1 %, il en résulte que $d_{(\bar{6}01)}$ doit augmenter lui aussi approximativement de 8 % en passant de l'albite à l'orthose. En d'autres termes, c'est dans la direction normale à $(\bar{6}01)$ que doit se produire la dilatation maximale quand on passe de l'albite à l'orthose.

Essayons de préciser le mécanisme de formation de la perthite. Considérons au début de la démixtion une zone où se sont concentrés les ions Na. Le réseau de l'albite va se former, ce qui s'accompagne d'une contraction. Cette contraction fait naître des contraintes dans la masse d'orthose environnante; des compressions vont apparaître dans la zone située de part et d'autre du cristal d'albite, dans une direction à peu près parallèle à $[010]$. (fig. 5).

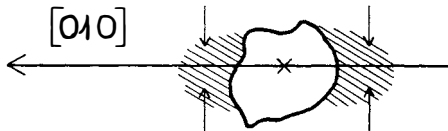


Figure 5. Formation d'un cristal d'albite dans un cristal d'orthose. Plan de la figure parallèle à $[010]$; les zones hachurées sont en compression.

Dans la charpente de tétraèdres SiO_4 et AlO_4 ainsi mise en compression, les ions K vont être chassés, et pour assurer la neutralité, des ions Na vont prendre leur place, par un processus analogue à celui qu'on admet dans la déformation des verres sodico-potassiques (voir par exemple Saucier (1960)). Une lamelle d'albite se développera donc parallèlement à $[010]$. Elle tendra naturellement à se limiter par des plans en zone avec $[010]$, et pour lesquels l'écart entre les mailles planes de l'orthose et de l'albite sera minimum, c'est comme l'écrit Smith le plan $(\bar{6}01)$. Suivant ce plan $(\bar{6}01)$ la maille plane s' de l'albite va néanmoins être obligée de se dilater pour assurer le raccordement avec l'orthose. Elle prendra la valeur $s'' > s'$. Admettons que le volume de la maille de l'albite reste constant, on aura alors

$$s' d'_{(\bar{6}01)} = s'' d''_{(\bar{6}01)}$$

c'est-à-dire que l'espacement des plans ($\bar{6}01$) va diminuer. C'est en effet ce qui paraît résulter des diagrammes de rayons X.

Si maintenant nous chauffons l'ensemble jusqu'à la température d'homogénéisation de la perthite, il va se former une zone de transition entre les 2 cristaux, où les contraintes vont pouvoir se libérer. Un allongement se produira qui aura sa valeur maxima suivant la normale à ($\bar{6}01$).

Le phénomène ne s'observera que si les lamelles d'albite sont suffisamment fines. Dans les perthites grossières, les tensions existant aux surface de contact n'auront pas d'action sensible au centre de chaque lamelle.

En ce qui concerne la phase potassique, pour les cristaux que nous avons observés où la proportion de feldspath potassique dépasse 70 %, le réseau de l'orthose forme des masses suffisamment épaisses pour qu'il ne soit pas sensiblement déformé dans son ensemble.

Observations sur la péristérite

Il est intéressant de comparer le comportement au chauffage des péristérites avec celui des perthites.

On sait que dans les plagioclases contenant de 5 à 17 % d'anorthite, il existe en réalité deux phases, l'une correspondant à l'albite presque pure, l'autre à un plagioclase approchant 30 % d'anorthite.

Nous avons recherché si au chauffage il se produisait dans la courbe de dilatation thermique un accident correspondant à une homogénéisation.

Trois dilatométries effectuées sur une péristérite de Villeneuve (Province de Québec — Canada) suivant 3 directions rectangulaires n'ont montré aucun crochet. On constate seulement qu'une contraction s'amorce à 1000°.

En effet le processus de formation des lamelles de péristérite doit être différent de celui invoqué dans le cas des perthites: la différence de diamètre entre les ions Ca et Na est faible par rapport à celle existant entre les ions Na et K. Par contre la charpente des tétraèdres SiO_4 et AlO_4 est modifiée quand, dans un cristal de plagioclase, la proportion d'anorthite varie.

La maille cristalline des plagioclases varie peu quand la composition chimique varie: voici par exemple les valeurs données par Smith (1956)

pourcentage d'anorthite :	0 %	31 %
a	8,144 Å	8,171 Å
b	12,787	12,486
c	7,160	7,129
α	94,26°	93,75°
β	116,58°	116,44°
γ	87,67°	89,25°

On voit que seul l'angle γ montre une différence importante.

Nous avons pu photographier au microscope électronique une réplique de la face (001) d'un cristal de péristérite de Villeneuve (fig. 6). On y voit la trace des lamelles (0 $\bar{8}$ 1) décrites par exemple par Brown (1960). Il semble que les deux phases soient en proportions voisines; on notera l'extrémité tordue de certaines des lamelles.

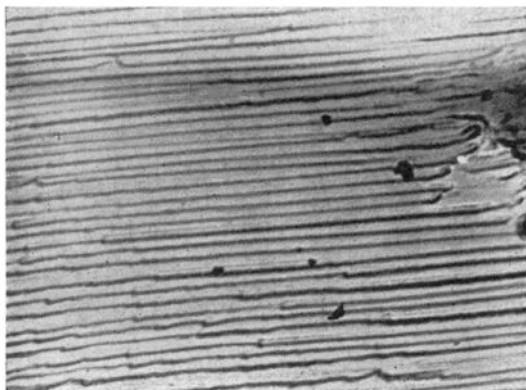


Figure 6. Photographie prise au microscope électronique de la réplique d'une face (001) d'un cristal de péristérite de Villeneuve (Canada), montrant la trace des lamelles (0 $\bar{8}$ 1). La plus grande dimension du cliché correspond à 7.6 microns.

Détermination de l'ellipsoïde des dilatations

Dans la 1^{ère} partie de cette étude, on a pu constater combien insuffisantes étaient les données que nous possédons actuellement sur les différents feldspaths pour fixer en position et en grandeur l'ellipsoïde des dilatations.

Dans le cas des feldspaths monocliniques, le problème est assez simple. Un des axes de l'ellipsoïde coïncide nécessairement avec l'axe

binaire du cristal. Le tenseur des dilatations possède 4 coefficients indépendants; on peut les obtenir en faisant des mesures de dilatation dans 4 directions différentes.

Pour les cristaux tricliniques, le tenseur possède 5 composantes indépendantes. Il faut donc au minimum faire 5 mesures. Ceci suppose la taille d'un grand nombre d'éprouvettes, éprouvettes qui doivent être monocristallines, ce qui est particulièrement difficile à réaliser dans le cas des plagioclases.

En outre, une fois les mesures faites, il faut, pour placer l'ellipsoïde, diagonaliser la matrice correspondante, ce qui est assez pénible.

Nous avons essayé de trouver une autre méthode.

Considérons une face du cristal, elle coupe l'ellipsoïde des dilatations suivant une ellipse E dont les axes correspondent aux dilatations principales pour le plan considéré. Si dans 3 plans différents nous arrivons à déterminer les éléments de l'ellipse correspondante, nous avons, même dans le cas d'un cristal triclinique, des données, en nombre surabondant, qui doivent permettre de déterminer avec une bonne précision l'ellipsoïde.

Pour connaître l'orientation des axes de l'ellipse E , nous avons d'abord pensé aux vernis craquelants (voir par exemple B. Salmon (1949)).

On sait que ces vernis sont utilisés pour l'étude de la résistance des matériaux. On recouvre une pièce d'acier par exemple, avec un vernis fragile. Cette pièce est ensuite soumise à un effort mécanique, elle se déforme, et des fissures apparaissent dans le vernis suivant une direction perpendiculaire à l'élongation maxima.

Supposons maintenant que nous ayons appliqué une couche de vernis sur une face d'un cristal de feldspath. Nous maintenons le cristal à une température de 112° par exemple, puis nous refroidissons jusqu'à la température ambiante. Le coefficient de dilatation du vernis étant supérieur à celui du feldspath, au cours du refroidissement des tensions vont naître, tensions qui auront leur valeur maxima suivant le petit axe de l'ellipse E . Des fissures vont apparaître parallèlement au grand axe de l'ellipse E .

La figure 7 correspond à une face (010) d'un cristal d'adulaire de Göschenen (Massif du St-Gothard — Suisse); on voit que les fentes sont suffisamment rectilignes, elles font un angle de $20-22^\circ$ avec la direction [100]. Fizeau, pour un cristal d'adulaire du St-Gothard,

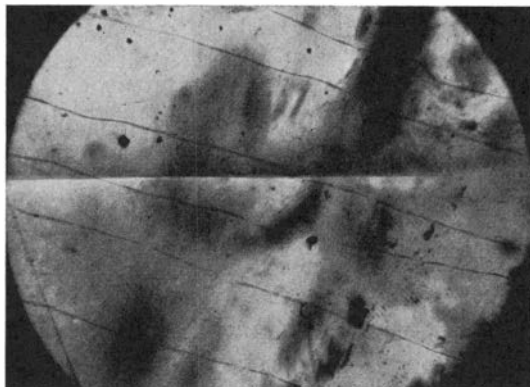


Figure 7. Face (001) d'un cristal d'adulaire de Göschenen (Suisse) recouvert d'un vernis craquelant. Les fentes, très fines, font un angle de 20–22° avec [100]. La plus grande dimension du cliché correspond à 1,7 millimètre.

trouvait un angle de 19° entre α_1 et [100], l'accord est assez satisfaisant.

Par contre le vernis craquelant déposé sur une face (010) d'un cristal d'albite, donne des craquelures dans toutes les directions. Nous verrons plus loin la raison de cette différence.

Nous avons aussi essayé les vernis photoélastiques [3]. Ces vernis sont, au même titre que les vernis craquelants, utilisés pour l'étude de la résistance des matériaux (Zandman (1956)). Une pièce métallique est recouverte d'une couche de vernis, puis déformée. La déformation du support produit des tensions dans la couche de vernis qui devient biréfringente. On détermine par réflexion de la lumière entre nicols croisés, les directions des vibrations lumineuses transmises par la couche de vernis, ce qui permet de connaître les 2 directions principales de la déformation.

Dans le cas des cristaux de feldspath (qui sont transparents), on commence par appliquer sur la face étudiée un vernis réfléchissant, puis le vernis photoélastique. Celui-ci est polymérisé à 100°. On refroidit ensuite le cristal dans la neige carbonique. Le coefficient de dilatation du vernis (environ $60 \cdot 10^{-6}$) étant beaucoup plus grand que les coefficients de dilatation des feldspaths, des contraintes appa-

[3] C'est M. S. Goldsztaub qui nous a appris l'existence de ces vernis photoélastiques. Qu'il trouve ici notre amical remerciement.

raissent. Nous déterminons les directions principales des dilatations en utilisant un microscope polarisant métallographique.

Dans le cas de l'adulaire de Göschenen nous trouvons ainsi que la direction α_1 fait un angle de 18° avec $[100]$, valeur en bon accord avec la valeur trouvée par Fizeau, soit 19° .

Dans le cas de l'albite, des observations faites à différentes températures montrent que les directions des vibrations observées peuvent tourner de près de 20° entre -60° et $+20^\circ$. On comprend pourquoi l'utilisation des vernis craquelants aboutit à un échec : au cours du refroidissement la direction de dilatation minima subit des changements de grande amplitude, et les fissures qui apparaissent n'ont plus d'orientation privilégiée.

Détermination en grandeur des axes de l'ellipse E

Pour déterminer la valeur des dilatations principales d'une face cristalline, nous avons renoncé aux mesures de biréfringence. C'était une méthode théoriquement possible. Mais les retards optiques observés sont faibles ; d'autre part l'épaisseur de la couche photoélastique est mal connue. Pour toutes ces raisons nous avons préféré avoir recours aux jauges extensométriques. On sait que ces jauges sont constituées par une résistance métallique collée sur la surface dont on veut connaître les déformations. Lorsque la jauge est soumise à une traction, sa résistance augmente proportionnellement à l'allongement. Un pont de mesure permet de déterminer cet allongement.

Sur l'adulaire de Göschenen on a ainsi déterminé :

$$\alpha_1 = 18,7 \cdot 10^{-6}$$

$$\alpha_2 = 1,3 \cdot 10^{-6}$$

$$\alpha_3 = -1,6 \cdot 10^{-6}$$

Ces valeurs sont assez peu différentes de celles trouvées par Fizeau sauf pour α_2 qui est positif, tandis que Fizeau trouvait $-1,5 \cdot 10^{-6}$.

Des mesures sur les plagioclases sont actuellement en cours. Elles se heurtent à de sérieuses difficultés provenant d'une part de la nécessité d'opérer sur des cristaux non maclés et, d'autre part, de la rotation rapide de l'ellipsoïde des dilatations quand la température varie, rotation déjà signalée par Beckenkamp.

Conclusion

Si insuffisantes que soient les données que nous possédons sur la dilatation thermique des feldspaths, elles nous apportent dès à présent des renseignements utiles. Nous avons vu plus haut quelques résultats donnés par les perthites. Par la suite on peut espérer tirer de l'étude dilatométrique des perthites des renseignements sur leur origine: perthites de démixtion ou perthites de substitution.

En ce qui concerne la structure atomique des feldspaths, on sait (W. H. Taylor (1933)) que des maillons formés par 4 tétraèdres SiO_4 ou AlO_4 s'associent pour donner des chaînes en zigzag dont l'allongement est parallèle à $[100]$ (fig. 8). Les chaînes sont liées latéralement entre elles par mise en commun d'atomes d'oxygène. L'existence de liaisons de même nature dans les trois directions de l'espace devrait, semble-t-il, créer une quasi-isotropie de la structure. Ce n'est pas du tout ce qu'on observe. Dans l'orthose la dilatation très forte suivant une direction voisine de $[100]$ est très faible ou même légèrement négative suivant les directions perpendiculaires.

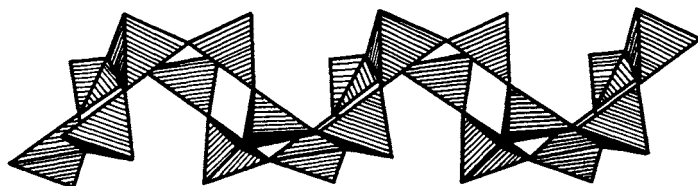


Figure 8. Chaîne de tétraèdres SiO_4 et AlO_4 dans les feldspaths.

Comparons les chiffres obtenus par Kozu (1925) (1934) avec l'augite et l'orthose, pour un échauffement de 20° à 800° :

	$\perp(100)$	$//[010]$	$//[100]$
Augite	0,44	1,03	0,51
Orthose	1,48 app.	0,09	0,16 app.

Ces chiffres mettent bien en évidence l'extrême anisotropie de la dilatation dans l'orthose.

Pour l'expliquer il faut tenir compte de ce que les liaisons à l'intérieur de chaque chaîne sont plus énergiques que les liaisons entre chaînes. Lors de l'échauffement les maillons constituant une chaîne vont garder des côtés, à peu de chose près, constants, mais les angles

de valences Si-O-Si et Si-O-Al vont se modifier. Il en résultera un allongement important de la chaîne, avec une faible contraction de la dimension transversale.

Une autre propriété de l'orthose viendrait confirmer cette hypothèse, c'est sa *compressibilité*. L'orthose est un minéral fortement compressible, ce qui est naturel vu sa structure peu compacte. Les coefficients mesurés par Bridgman (1928) sont les suivants :

//[100]	//[010]	//[001]
1,01	0,56	0,47 10 ⁻⁶ cm ² /Kg

L'anisotropie, moins marquée que pour la dilatation thermique, est encore fort nette. La compressibilité maxima se produit suivant une direction voisine de [100]. Les chaînes se comportent comme un accordéon.

L'anisotropie de la dilatation des feldspaths reste du même ordre si le sodium remplace le potassium. Par contre lorsque le calcium divalent intervient dans le réseau, lorsque la proportion d'aluminium augmente dans les chaînes, le mouvement d'accordéon devient plus difficile, l'anisotropie diminue.

REFERENCES

- BECKENKAMP, J. (1881): Ueber die Ausdehnung monosymmetrischer und asymmetrischer Krystalle durch die Wärme. Zeitschr.Krist.Mineral., vol. 5 (1881) pp. 436.
- BRAGG, W. L. (1937): Atomic structure of minerals. 1 vol. Cornell University Press (1937) p. 233.
- BRIDGMAN, P. W. (1928): The linear compressibility of thirteen natural crystals. Amer.Jour.Sci., 5th. Ser. vol. 15 (1928) pp. 287.
- BROWN, W. L. (1960): The crystallographic and petrologic significance of peristerite unmixing in the acid plagioclases. Zeitschr.Krist., vol. 113 (1960) pp. 330.
- FIZEAU, H. (1868): Sur la dilatation des corps solides par la chaleur (deuxième Mémoire, seconde partie). Compt.Rend.Acad.Sci.France, vol. 66 (1868) pp. 1072. Ann. der Physik und Chemie, 5è série vol. 15 (1868) pp. 372.
- KOPP, H. (1852): Ueber die Ausdehnung einiger festen Körper durch die Wärme. Poggendorffs Annalen, vol. 86 (1852) pp. 156.
- KOZU, S. et SAIKI, S. (1925): The thermal expansion of alkali-feldspars. Sci.Repts. Tohoku Imp. Univ., vol. 2 (1925) pp. 203.
- et UEDA, J. (1933): Thermal expansion of plagioclase Proc.Imp.Acad. (Tokyo), vol. 9 (1933) pp. 262.
- et UEDA, J. (1934): Thermal expansion of Augite. Proc.Imp.Acad. (Tokyo), vol. 10 pp. 87.

- LAKSHMI NARAYANA RAO, S. V. (1959): Low temperature alkali feldspar series. Norsk Geol. Tidsskr., vol. 39 (1959) pp. 275.
- MITSCHERLICH, E. (1824): Ueber das Verhältnis der Form der krystallisierten Körper zur Ausdehnung durch die Wärme. Poggendorffs Annalen, vol. 1 (1824) pp. 125.
- NEUMANN, C. (1861): Ueber die thermischen Axen der Krystalle des ein- und eingliedrigen Systems. Poggendorffs Annalen, vol. 114 (1861) pp. 492.
- OFFRET, A. (1890): De la variation, sous l'influence de la chaleur, des indices de réfraction de quelques espèces minérales, dans l'étendue du spectre visible. Bull. Soc. Franç. Minéral., vol. 13 (1890) pp. 405.
- RINNE, F. (1914): Die Kristallwinkelveränderung verwandter Stoffe beim Wechsel der Temperatur I. Centralbl. Mineral., (1914) pp. 705.
- ROSENHOLTZ, J. et SMITH, D. (1941): Linear thermal expansion of adularia. Amer. Mineral., vol. 26 (1941) pp. 991.
- et SMITH, D. (1942): Thermal studies of orthoclase and microcline. Amer. Mineral., vol. 27 (1942) pp. 344.
- SALMON, B. (1949): Etat actuel de la méthode des vernis craquelants. Tech. Sci. Aéronaut., n° 6 (1949) pp. 343.
- SAUCIER, H. (1960): Rhéologie des verres minéraux — *in* Introduction à l'étude de la rhéologie par PERSOZ et alii, 1 volume Paris 1960.
- SMITH, J. V. (1956): The powder patterns and lattice parameters of plagioclase feldspars I. The soda-rich plagioclases. Mineral. Mag., vol. 31 (1956–58) pp. 47.
- (1961): Explanation of strain and orientation effects in perthites. Amer. Mineral., vol. 46 (1961) pp. 1489.
- TAYLOR, W. H. (1933): The structure of sanidine and other feldspars. Zeitschr. Krist. vol. 85 (1933) pp. 425.
- TUTTLE, O. F. et BOWEN, N. L. (1952): Silicates in the presence of water under pressure. Carnegie Inst. of Wash. Year Book n° 51 (1952) pp. 37, diagramme *reproduit dans* Physics and Chemistry of the Earth, vol. I p. 172. édité par Ahrens, Rankama et Runcorn, London (1956).
- ZANDMAN, F. (1956): Analyse des contraintes par vernis photoélastiques. Anal. des Contraintes, vol. 2 (1956) n° 6 pp. 3.