Nicht einzeln im Buchhandel erhältlich

Sonderdruck aus der Geologischen Rundschau Band 60, 1971

Ferdinand Enke / Verlag / Stuttgart

Structure et mise en place des massifs phonolitiques du Cantal (Auvergne, France)

Par JACQUES VARET, Orsay *)

Avec 16 figures

*) Adresse de l'auteur: J. VARET, Dépt. de Géologie, Bât. 504, Université d'Orsay, F-91 Orsay, France. Adresse actuelle (1971 — Juin 1972) Dt. of Geology, H. S. I University P.O. Box 1176, Addis Abeba, Ethiopia.

Geol. Rundschau	60	3	948—970	Stuttgart, Juni 1971

Zusammenfassung

Die Struktur von Phonolith-Domen wurde anhand verschiedener Kriterien untersucht: Orientierung der Phenocrysten, Größe und Form der Kristalle, durch Röntgendiffraktion bestimmte Textur der Grundmasse, Fließstruktur und Klüftung.

Die Beziehungen zwischen Fließstruktur, Wachstum und Orientierung der Minerale, bankiger Absonderung und Klüftung werden untersucht unter Berücksichtigung der vulkanischen Geschichte dieser viskosen Extrusionen, wobei sich die Untersuchung der Bankungsrichtung am aufschlußreichsten für die Kenntnis der Extrusionsgeschichte der Phonolith-Dome erweist.

Eine Reihe von Phonolith-Massiven des Cantal werden als Beispiel angeführt, und eine kurze Synthese der verschiedenen Strukturformen wird dargestellt.

Abstract

The structure of phonolitic domes was studied using various criteria: orientation of phenocrysts, size and shape of crystals, texture of the groundmass determined by X-ray diffraction, flow-structure and jointing. The most efficient criteria are discussed.

The relationship between flow-structure, growth and orientation of the minerals, sheeting and jointing are studied with respect to the emplacement process of the volcanological evolution of these viscous extrusions.

The orientation of the "lauzes" (sheets) proves most indicative of conditions of extrusion of the phonolitic domes, whereas the jointing only indicates their cooling history.

Some phonolitic domes of Cantal are shown, and a short synthesis of various structural types is made.

Résumé

Après un inventaire des différents critères de structure qu'offrent les dômes phonolitiques, et une présentation de leur méthode d'étude, le problème du choix des critères les plus efficaces est discuté.

Les relations entre fluidalité, croissance et orientation des minéraux, débit en lauzes et prismation sont présentées en fonction du processus de mise en place de ces extrusions visqueuses endogènes.

L'étude de l'orientation des lauzes se montre la plus efficace pour connaître les conditions d'extrusion des dômes phonolitiques.

Un certain nombre de massifs phonolitiques du Cantal sont donnés en exemple, et une brève synthèse sur les différentes formes structurales présentes est tentée.

Краткое содержание

С помощью самых различных методов определяли структуру и текстуру фонолитовых пород купола Cantal, Франция: ориентировку кристаллов, их величину, форму, и минералогический состав основной массы.

Определили связь между флуидальной структурой, ростом и ориентировкой отдельных минералов, матрацевидной отдельностью и трещиноватостью, учитывая вулканическую историю этих вязких экструзий; при этом оказалось, что для познания экструзивной истории фонолитических пород куполов наиболее существенным критерием является простирание пластов.

На примере массива фонолитов Cantal кратко рассмотрены различные структурные формы.

Dans le Cantal, les formes volcanologiques des phonolites sont essentiellement représentées par des extrusions visqueuses endogènes: dômes, lames, et coulées. L'étude a trait essentiellement aux massifs du Cantal septentrional (VARET, 1967 a et 1968), avec quelques exemples du reste du massif (fig. 1).

A. Les critères de structure

Les éléments de structure sont de type planaires ou axiaux, car les roches se débitent en plans alors que les minéraux sont allongés ou aplatis dans ces plans (fig. 2). Il existe aussi plus rarement d'autres éléments orientés, plus tardifs dans l'histoire du gisement. Ce sont des plans de glissement striés, de structure linéraire orientée, présents à *Menoyre* (VARET, 1967 a), *Augoules, Haut-Alliès,* et dans le massif phonolitique de *Tau.* Les trois critères principaux de structure que nous retiendrons sont l'orientation des minéraux, le débit en lauzes et le débit prismatique. Ces critères ont été déjà retenus et discutés par de nombreux auteurs: WILLIAMS (1932), TOMKEIFF (1940), BEARD (1959), SMALLEY (1966). L'allongement ou l'aplatissement des bulles (WATERS, 1960) ne peut être retenu comme critère dans les phonolites car ces roches ne sont que très exceptionnellement bulleuses.

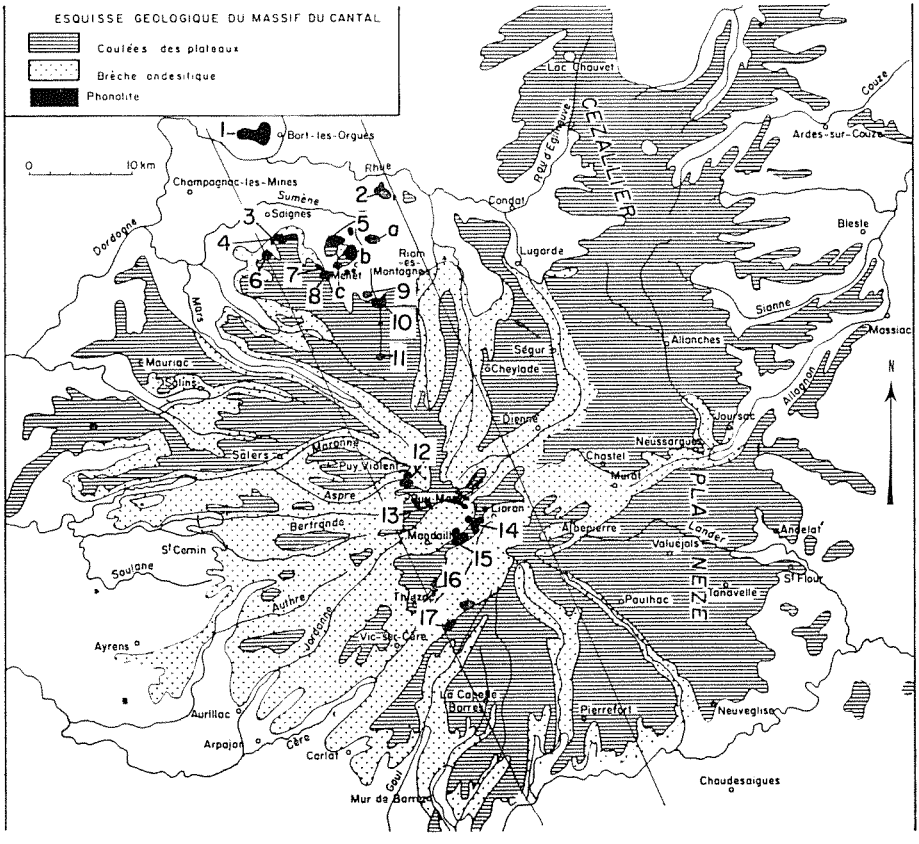

Fig. 1 Localisation des massifs phonolitiques dans l'édifice volcanique du Cantal. Observer l'alignement des massifs en bande de direction NNW—SSE. Pour le centre du massif, données de VATIN-PERIGNON (1966). Pour la région de Menet, données de J. VARET (1968). N'ont été numérotés ici que les massifs nommés dans le texte.

1. *Bort les Orgues* = dôme-coulée de phonolite tephritique. 2. *Urlandes* = dôme de phonolite miaskitique. 3. *Ribes-Milhac* = dômes-coulée de phonolite tephritique. 4. *Chastanat* = petite lame verticale. 5. *Vinsac* = complexe de phonolite miaskitique = coulée recouverte d'un dôme-coulée. 6. *Auteroche* = dôme lame oblique de phonolite agpaïtique. 7. *Brocq* = complexe extrusif avec piperno trachytique à blocs de syénite néphélinique, dôme trachytique et coulée phonolitique. 8. *Aldis* = Aiguille verticale arasée de phonolite miaskitique. 9. *Roche* = dôme de forme ellipsoïdale, phonolite miaskitique. 10. *Marcombes* = coulée ancienne de phonolite téphritique. 11. *Aldis* = dôme de phonolite agpaïtique. 12. *Taillade* = dôme-aiguille («dent») de phonolite miaskitique. 13. *Col de Roche noire* = filon de phonolite (épaisseur 1 à 4 mètres). 14. *Griou-Grionnot* = dômes phonolitiques. Le Grionnot est recoupé postérieurement à sa mise en place par un dyke basaltique. 15. *L'Usclade* = dôme phonolitique. 16. *La Jarrigue* = filon de phonolite de grande extension (longueur 1800 m, largeur 5—10 m). 17 *Le Tau* = dôme phonolitique. — a) Dôme trachytique d'*Augoules*. b) Dôme trachytique de *Menoyre*. c) Dôme trachytique de *Haut-Alliès*.

B. Techniques de mesure

1. Orientation des phénocristaux

Dans quelques cas il est possible de faire une étude macroscopique sur le gisement de l'orientation des phénocristaux (CLOOS, 1927), comme dans les massifs de *Roche,* de *Cournil* et *Auteroche.* Les faces (010) des anorthoses sont alors parallèles aux plans des lauzes, l'axe *c* étant orienté de

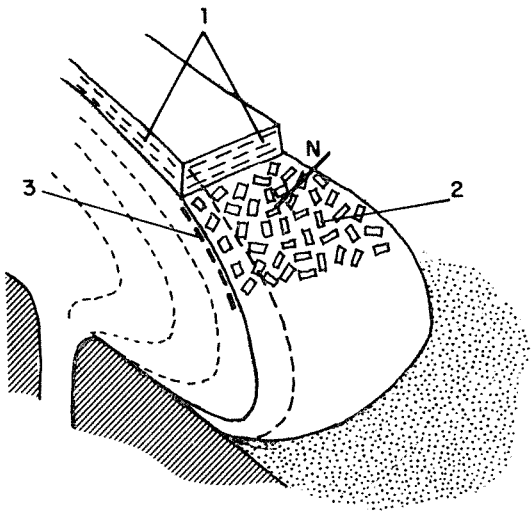

Fig. 2. Ecorché schématique d'un dôme phonolitique. — En 1: «fluidalité» des microlites dans toute section oblique ou perpendiculaire au plan de surface. — En 2: Orientation quelconque des phénocristaux situés à plat dans le plan de surface (Axe *b* parallèle à *N*, normale au plan de surface l'axe *c* restant quelconque). — En 3: orientation des phénocristaux dans le plan des lauzes. Les pointillés indiquent les traces des surfaces, enveloppes des plans de lauzes.

façon quelconque. Ainsi, dans le cas des phonolites, l'étude de l'orientation des lauzes équivaut-elle à celle de l'orientation des plans (010) des feldspaths.

2. Orientation, dimension et forme des minéraux au microscope

Les phonolites présentent le plus souvent en lame mince une texture fluidale [1]) car ces lames sont taillées perpendiculairement au plan des lauzes, et ce sont donc autant de plans perpendiculaires à l'axe (010) des feldspaths que l'on peut examiner.

[1]) A l'inverse, nous constatons que les trachytes cantaliens ont rarement la structure fluidale (BROUSSE et VARET, 1966). Dire de la structure fluidale qu'elle est aussi «trachytique» est commettre une inexactitude.

a) Méthode de B. SANDER (1911).

Il est bien sûr possible d'effectuer la mesure systématique, au moyen de la platine théodolite, de l'orientation des axes optiques (ou d'un autre repère cristallographique) de certains minéraux (SANDER, 1911; SZOKE, 1966; ARKAI, 1967) mais ces mesures nécessitent un travail fastidieux. Déjà délicate pour les roches grenues, cette méthode devient inadéquate dans le cas des roches à cristallisation fine (grain moyen de 20 à 50 microns).

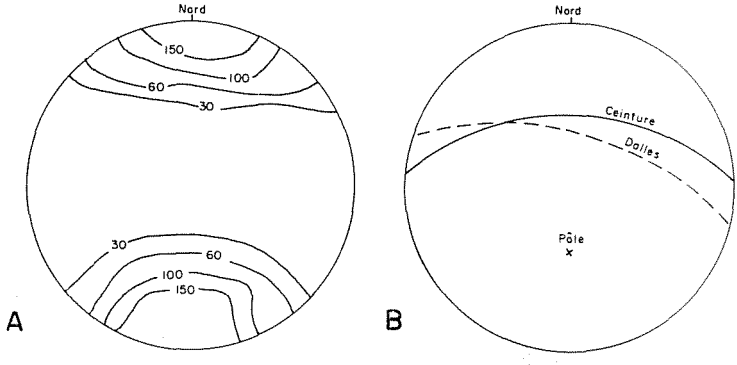

Fig. 3. Orientation des feldspaths de la phonolite de l'Usclade, déterminée au moyen du diffractomètre de texture (F. LOTHE, 1968). — En A = Répartition des axes (060) parallèles à *b* indiquant la présence d'un pôle. — En B = Relation entre ceinture et plans de lauzes (dalles). Les plaquettes de feldspath sont donc disposées selon le plan de lauze et sont orientées de façon quelconque dans ce plan.

b) Méthode Roentgenographique

Enoncé par SANDER et SACHS (1930), et KRATKY (1930), la méthode a été successivement appliquée et précisée par de nombreux auteurs, citons: HIGGS, FRIEDMAN et GEBHART (1960), D'ALBISSIN et ROBERT (1962), WENK (1963), puis LOTHE (1968).

En ce qui nous concerne, nous avons placé sur le diffractomètre la roche à étudier, taillée en cube de 1,5 cm d'arête, dont une des faces est parallèle au plan de lauze. Chaque face polie a été examinée dans un domaine angulaire de 18 degrés (de 7 à 25 degrés, Kα Co), la totalité du pinceau de rayons X étant interceptée par l'échantillon. Ainsi nous avons pu comparer les intensités relatives des pics obtenus et en déduire l'anisotropie des échantillons. Ces mesures permettent de constater que les feldspaths ont leur axe *b* préférentiellement orienté suivant la perpendiculaire au plan de lauze, alors que l'orientation des deux autres axes est quelconque dans ce plan. Il s'ensuit une structure *planaire* et *uniaxe* (A ∞, ∞ M), conforme à ce qu'a montré LOTHE (1968) (fig. 3): Cette même structure est valable pour les autres minéraux, à l'exception des phases tardives: analcime et aegyrine des phonolites agpaitiques (VARET, 1969).

c) Aplatissement des minéraux

A la méthode de mesure par le micromètre, nous avons substitué une mesure du diamètre moyen des minéraux (VARET, 1967 b) dans différentes directions, afin de définir un «*schéma morphostructural*». Ce schéma permet de traduire à la fois l'allongement et l'écart à l'orientation privilégiée que possèdent les minéraux (fig. 4) dans les lames taillées perpendiculairement aux lauzes. Cette méthode, généralisée à l'étude d'un dôme montre

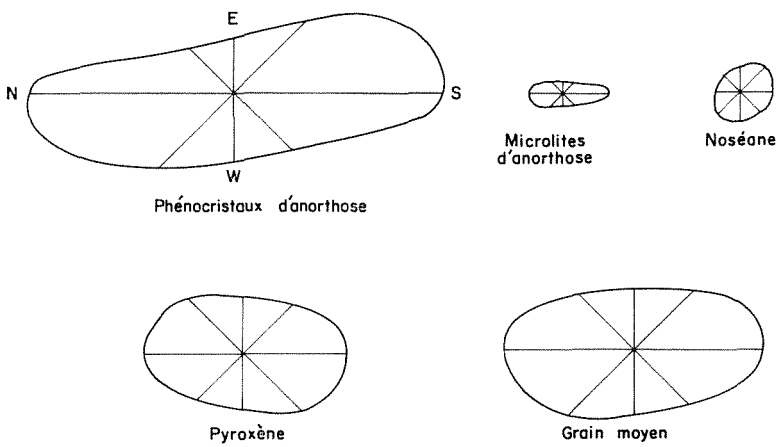

Fig. 4. «Schéma morphostructural» de quelques minéraux de la phonolite d'Auteroche, selon un plan perpendiculaire aux lauzes. Ce schéma est obtenu en mesurant le diamètre moyen orienté (VARET, 1967 a) des différents minéraux dans des directions repérées par rapport au plan de lauze (N.S. plan de lauze, E.W. plan perpendiculaire). On constate que les minéraux s'adaptent différemment aux conditions anisotropes selon leur symétrie propre. Les feldspaths monocliniques sont mieux orientés et plus aplatis que la noséane cubique. Echelle × 100; noséane et minolites × 1000.

que les minéraux sont très aplatis et bien orientés en bordure, alors qu'ils sont plus trapus au centre, la roche étant isotrope (fig. 5).

En fonction de leur classe de symétrie, les minéraux suivent plus ou moins bien la loi d'orientation. Ainsi, les minéraux monocliniques sont plus aplatis et mieux orientés que les minéraux à plusieurs axes (cubiques par exemple). C'est dire que *l'arrangement et la forme des minéraux (adaptation morphostructurale) est d'autant plus conforme à la symétrie de la roche qu'ils possèdent eux-mêmes, une symétrie analogue à celle de la roche.*

d) Dimension des minéraux

La variation de la dimension des minéraux d'un massif est aussi un bon critère de structure (fig. 6). Il y a par exemple diminution de la dimension des minéraux depuis le centre du massif de *Milhac*, associée à une diminution du nombre des phénocristaux, qui disparaissent même en bordure.

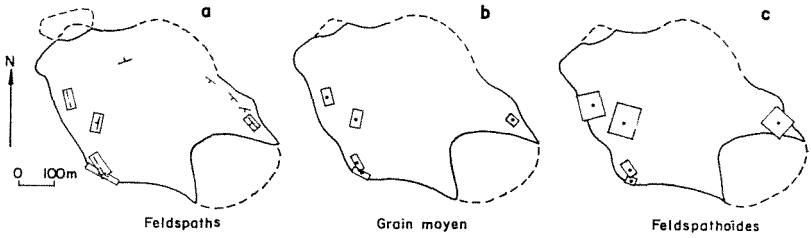

Fig. 5. Variation de l'aplatissement des anorthoses et de la taille des minéraux au sein du massif d'Auteroche (voir aussi fig. 12). La dimension des minéraux est mesurée dans des sections perpendiculaires aux lauzes, sur deux directions perpendiculaire et parallèle au plan de lauze. En chacun des points d'échantillonnage, chaque minéral peut être représenté par un rectangle allongé dans le plan des lauzes. On constate un aplatissement des minéraux en bordure, alors qu'ils tendent à devenir isotropes dans la zone centrale. La dimension des minéraux est croissante depuis la bordure vers le centre, ceci est particulièrement net pour les feldspathoïdes. Echelle × 200.

Cette observation rejoint celle de Arkai (1968 a), qui a étudié cette variation dans certains complexes andésitiques de Hongrie, en la mettant en relation avec la vitesse de refroidissement, ainsi que celle de Girod (1964) dans l'Atakor. Nous l'avons également observé dans la série d'Adua-Axum (Tigré Ethiopie), où le centre des massifs possède un facies grenu alors que la bordure est microlitique.

3. Débit en lauzes (fig. 7)

Les phonolites du Cantal présentent la caractéristique de se débiter en lauzes, plaques sonores, jadis fréquemment exploitées pour les toitures *(Roche, Cournil, Vinsac)*.

Il serait possible de mesurer l'anisotropie mécanique des roches (Williams, 1887; Micheluccini, 1963), puisque la résistance est plus faible dans le plan des lauzes que dans les autres plans. Plutôt que de mettre en oeuvre cette technique longue, nous nous sommes limités sur le terrain à la mesure de l'orientation et du pendage des lauzes (fig. 8). Il apparaît que les dalles sont développées selon des plans parallèles aux contacts des massifs, c'est à dire au paléorelief dans le cas des coulées (*Vinsac, Milhac*), aux épontes pour les intrusions (*Chastanat, Roche noire*).

Comme le fait remarquer Arkai (1968), cette propriété qu'ont certains dômes et coulées permet de reconstituer la paléotopographie à partir de l'étude du pendage des lauzes ou d'estimer l'importance d'une érosion (Varet, 1970).

4. La prismation

Les auteurs s'accordent pour voir dans les prismes des colonnes de contraction *perpendiculaires aux surfaces de refroidissement* et contemporaines de celui-ci (Thomson, 1863; Iddings, 1886; Klupfel, 1952; Spy, 1962; Berger, 1964; Brousse, 1965; Smalley, 1966). Une bibliographie très com-

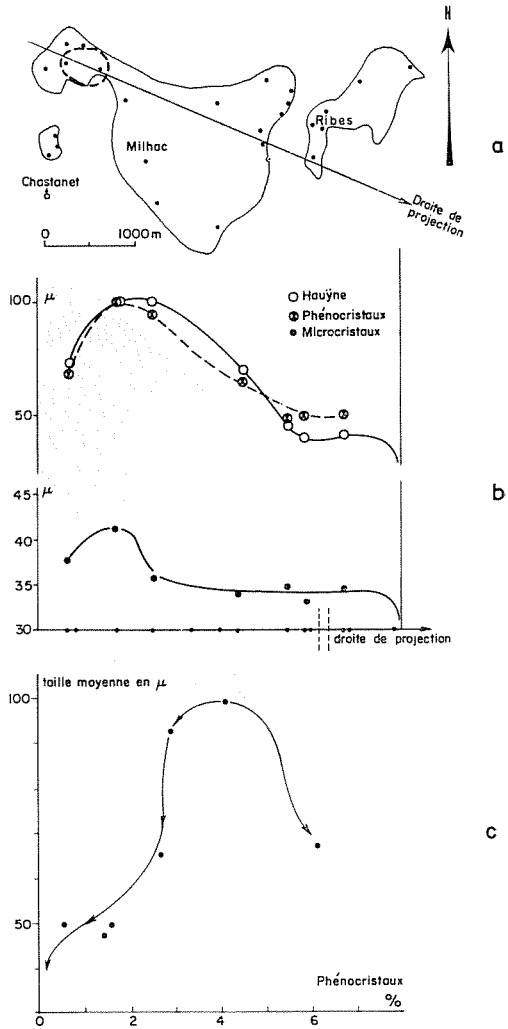

Fig. 6. Variation du grain moyen modal des minéraux dans le dôme-coulée de Ribes-Milhac. — En a: Carte des échantillons mesurés. Les points ont été projetés le long d'une droite placée selon une direction d'allongement du massif. — En b: Variation, en microns, de la dimension des minéraux en fonction de leur origine géographique repérée selon la droite de projection définie en a. On constate que la taille des phénocristaux et des microlites diminue dans la zone bordière. La zone entourée d'un tireté sur la carte a correspond à la zone d'émission, et se caractérise par une plus grande dimension des phénocristaux et des microlites. On constate que la dimension des microlites est constante dans le reste de la coulée («table de Milhac»). — En c: Relation entre la teneur en phénocristaux de la roche et la dimension de ceux-ci. On constate que les phénocristaux sont plus nombreux dans la zone où ils atteignent la plus grande dimension (zone d'émission), alors qu'ils disparaissent dans la zone bordière.

plète sur l'origine de la prismation a été effectuée par TOMKEIEFF (1940). Les données plus récentes sont discutées par MACDONALD (1967). Ces études sont généralement limitées aux basaltes.

Tout comme les basaltes, les phonolites se débitent en prismes mais à la différence de ces premiers, ceux-ci ont de très forts diamètres (1 à 4 mètres), à quelques exceptions près. Parmi celles-ci signalons les dykes de faible épaisseur, certaines zones d'épanchement à éléments finement prismés (*Fort de Milhac, Urlandes-Sud*), et certaines bordures de gros massifs (*Griounnot, Taillade*).

Dans les formes mises en place à l'air libre ces prismes sont le plus souvent *verticaux, quelque soit le mode d'épanchement de la lave* en coulée, dôme ou lame. Dans les murs (dykes) par contre, les prismes sont horizontaux (*Chastanat, Roche Noire*).

Comme ces prismes sont perpendiculaires aux contacts alors que les lauzes leur sont parallèles, celles-ci devraient toujours se débiter perpendiculairement au grand axe des prismes. Cette notion est d'ailleurs fréquemment admise. En fait, ce cas est rarement observé et il existe le plus

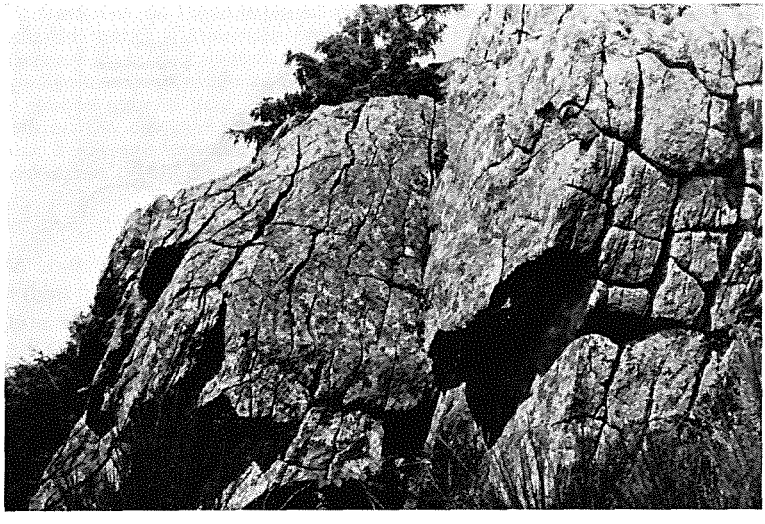

Fig. 7. Photographie d'un affleurement du massif d'Auteroche. Noter le débit en larges dalles verticales, à quelques dizaines de mètres de la bordure du dôme.

souvent un *angle notable entre les axes des prismes et des lauzes.* L'interprétation de cette observation sera discutée plus loin, et mise en relation avec le fait que prismes et lauzes ne sont pas synchrones, les prismes étant tardifs (RUTTEN, 1963).

C. Interprétation des phénomènes

1. Causes de la structure

On peut considérer les roches volcaniques comme des «tectonites» puisque «leur structure a été acquise au cours d'une phase de déformation continue» (SANDER, 1950). Envisageons les différents facteurs susceptibles d'imposer une structure à une masse de magma visco-élastique en cours de croissance et en voie de refroidissement.

Le fait qu'il ne soit pas possible de définir de direction de linéation au sein des structures planaires assure que les facteurs responsables de ce phénomène ont au moins une symétrie uniaxiale

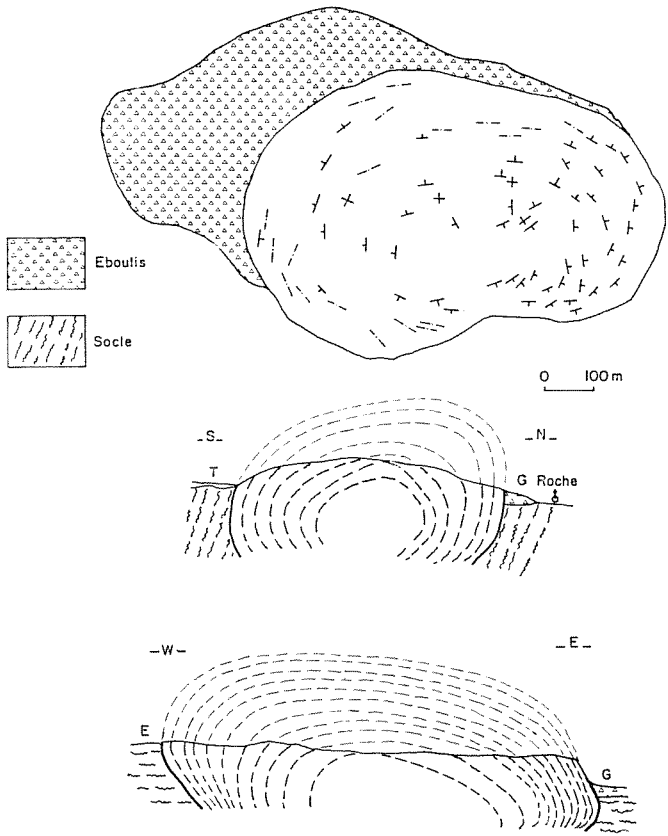

Fig. 8. Carte structurale du massif de Roche de Valette, et coupes déduites des mesures de pendage.

(A ∞, ∞ M), car la loi de Curie indique que la symétrie du phénomène observé (texture) est égale ou supérieure à la symétrie de la cause.

Il est alors possible d'envisager les causes suivantes:

a) pression orientée
b) gradient thermique
c) tension de surface
d) écoulement.

a) En bordure de massif, l'anisotropie des ellipsoides de pression est très forte, tandis que la pression est isotrope au centre du massif. La direction de la pression principale est perpendiculaire aux contacts. Ainsi, les lauzes se développent-ils selon des plans perpendiculaires à la pression principale. La surface enveloppe des lauzes mime les plans de plus faible contrainte.

b) Dans la masse de la lave en cours de refroidissement, les isothermes sont plus proches dans les parties les plus externes, la partie intérieure restant à une température homogène. Les isothermes sont grossièrement parallèles aux contacts.

Les deux premiers facteurs sont compatibles avec les données de terrain:

— Le débit en lauzes, l'aplatissement et l'orientation des minéraux sont toujours meilleurs en bordure de massif

— Le plan des lauzes est toujours équivalent à celui des parois, qui constituent des surfaces isobares et isothermes. Nous l'avons constaté pour les dômes (*Auteroche, Roche, Taillade,* etc.) ainsi que pour les coulées (*Vinsac, Ribes*) qui traduisent certaines irrégularités du relief par leurs pendages parallèles à la topographie des lieux recouverts.

c) La tension de surface peut être invoquée dans la partie supérieure des dômes, qui a nécessairement refroidit à l'air libre. En effet, la carapace plus visqueuse qui tend à se former en bordure est constamment sujette, du fait de la croissance interne du dôme, à une tension locale qui crée un étirement de la lave suivant le plan de contact. Ce facteur permet d'expliquer la présence d'un débit en plaques dans la partie supérieure des extrusions.

Cet étirement pourrait aller jusqu'à la rupture de la couche superficielle. Cette hypothèse permet d'interpréter les craquelures observées à la surface du dôme d'*Auteroche.* Ces zones de rupture pourraient être le lieu de l'écoulement de laves issues de parties internes du dôme (*Roche de Valette)* [2]).

d) Si la mise en place des dômes visqueux présente des analogies avec l'épanchement des liquides, il est difficile cependant de relier la fluidalité observée en lame mince à un écoulement laminaire, avec arrangement des baguettes cristallines parallèlement à une direction dite d'écoulement. Cette notion, fréquemment admise, est à rejeter car il n'est pas possible de définir la direction de linéation correspondant à une éventuelle direction d'écoulement, si ce n'est l'axe perpendiculaire aux plans de structure. De plus elle est contraire aux lois des écoulements visqueux ou visco-élastiques, qui ne font pas intervenir les notions d'écoulements laminaire et turbulent, limitées aux fluides parfaitement newtoniens.

Il ne semble donc pas que l'écoulement permette d'expliquer ni l'orientation des minéraux dans les dômes, ni le débit en lauzes, à moins qu'il ne s'agisse d'un «écoulement» *de direction perpendiculaire aux lauzes* dans les dômes (fig. 9). Dans les coulées de phonolites téphritiques plus fluides (*Bort, Ribes-Milhac*), un véritable écoulement est sans doute possible.

[2]) Dans certaines zones du massif de Roche de Valette, un liquide phonolitique s'est mis en place, postérieurement à l'extrusion majeure, à la faveur de plans de fracturation recoupant les lauzes. La lave tardive possède une texture isotrope tranchant avec la texture fluidale de la phonolite encaissante. Ce dernier liquide est moins différencié que la masse globale de l'extrusion (VARET, 1967 b et 1969).

2. Relation entre cristallisation et déformation

En structurologie trois types d'objets sont distingués:

— les objets antécinématiques [certains phénocristaux [3]), ou cristaux tôt-formés];

— les objets syncinématiques (microcristaux, cristaux formés alors que la lave se met en place);

— les objets postcinématiques (analcime, aegyrine des phonolites agpaitiques, de cristallisation tardive).

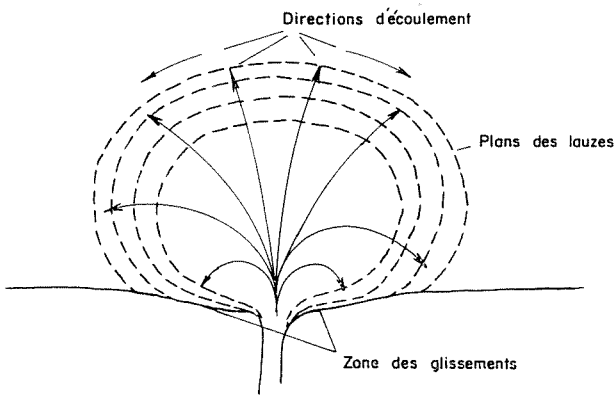

Fig. 9. Représentation schématique des «directions d'écoulement» dans un dôme phonolitique. Orientation des minéraux par rapport à cet écoulement (tireté). Localisation des zones de glissements à la base du massif. Les glissements se produisent alors que la lave est encore pâteuse, postérieurement à la formation des plans de lauzes. Les plans de glissements sont striés, à la différence des plans de lauzes qui constituent des surfaces d'isoécoulement. Ce type de structure est exceptionnel dans les massifs phonolitiques et correspond à une rupture (cizaillement) de la lave en cours d'étirement dans les zones de contact avec l'encaissant.

La lave se met en place à l'état visqueux. Cette viscosité est en relation étroite, dans un magma de composition donnée, avec la teneur en germes cristallins et le pouvoir de cristallisation des minéraux (fig. 10). La phase de haute viscosité de la lave phonolitique est synchrone de l'épanchement. La forme même des massifs qui se sont mis en place le plus souvent avec un très faible débordement latéral (dôme, lames, aiguilles, dents) témoigne de cette viscosité. Les observations effectuées précédemment montrent d'autre part que la plupart des minéraux ont crû sous tension. Ainsi *la formation de la plupart des cristaux est synchrome de l'épanchement.* Ainsi, la plupart des minéraux ont cru sous l'influence de conditions

[3]) Dans les extrusions alcalines, la subdivision phénocristaux-microcristaux est extrêmement arbitraire. Ces roches présentent en effet des grains dont la dimension décroît régulièrement, et sont très rarement de granulométrie bimodale. Il est de toute façon difficile de relier la dimension des cristaux à leur lieu de formation et les données de terrain montrent que des phénocristaux se forment au cours de l'extrusion.

de pression anisotrope (pression normale aux parois et étirement dans le plan des parois) qui régnaient localement lors de la mise en place du dôme et sont donc syncinématiques. L'observation montre que, dans un même échantillon, la plupart des minéraux ont la même orientation planaire, quelque soit leur taille.

Dans le cas de phénocristaux formés dans la chambre magmatique, et donc antécinématiques, ont peut attribuer leur orientation à l'action du

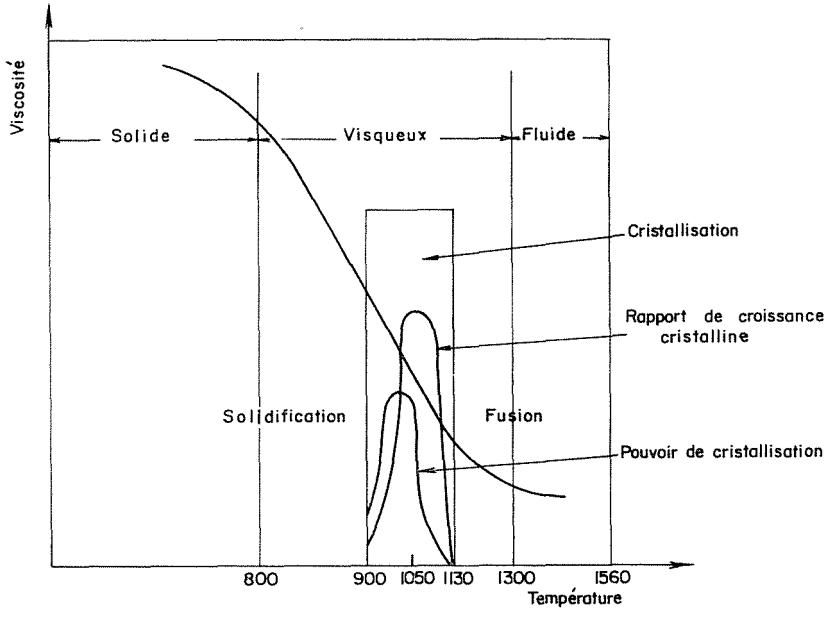

Fig. 10. Relation entre viscosité, teneur en germes cristallins, et pouvoir de cristallisation de ces germes.

reste de la masse phonolitique en cours de déformation. L'observation montre fréquemment des phénocristaux déformés ou cassés par la masse microlitique en mouvement. Le mécanisme de l'orientation des minéraux dans les roches métamorphiques proposé par Goguel (1965) peut être repris pour ces épanchements de haute viscosité. Des cristaux soumis à une contrainte mécanique en équilibre dans un liquide soumis à une pression hydrostatique croissent ou disparaissent selon l'orientation relative des cristaux et de la contrainte. Les grains les plus solubles disparaissent, les moins solubles s'accroissent, selon que leur énergie élastique est maximale ou minimale. Ainsi, la croissance sous contrainte aboutit à la prédominance statistique des orientations de grains cristallins pour lesquels l'énergie élastique est minimale. Bien que nous ne possédions pas les données expérimentales ou calculées pour l'anorthose, il est certain que l'énergie

élastique de ce minéral est minimale selon l'axe b, puisque seuls subsistent les grains dont l'axe b est parallèle à la contrainte.

A l'inverse des anorthoses, les derniers minéraux à cristalliser (analcime et aegirine des phonolites agpaïtiques par exemple) commencent à croître après la phase de déformation, et sont effectivement non-orientés (LOTHE, 1968).

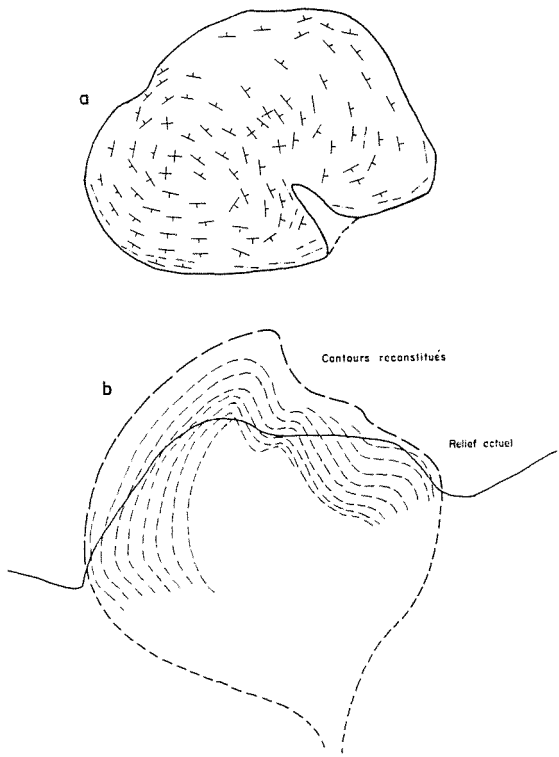

Fig. 11. Carte structurale du massif de Roche Taillade, établie à partir de la mesure systématique de l'orientation des lauzes, et coupes interprétatives.

3. Relation entre prismes et lauzes

Les lauzes sont contemporaines de l'épanchement et fossilisent la dynamique de la mise en place (flow structure).

Les prismes, par contre, affectent la lave *postérieurement à sa cristallisation* et une fois que le massif s'est mis en place. Aussi sont-ils verticaux dans un dôme refroidi à l'air libre, indépendamment des vicissitudes préalables de sa mise en place. Prismes et lauzes sont donc rarement en relation géométrique, ils «fossilisent» des *périodes différentes de l'histoire volcanologique du massif*. Ainsi peut-on conclure que les joints collumnaires, postérieurs à l'épanchement, ne donnent aucune indication sur le processus de mise en place. Ils se développent normalement aux plans de

tension maximale, qui sont dans la plupart des cas parallèles aux isothermes, et indiquent seulement les conditions de refroidissement du dôme.

D. Mise en place des dômes du Cantal

1. Différents types de structure

Le Cantal offre différents types morphologiques et structuraux de cumulo-volcans. Bien que les méthodes employées soient limitées aux conditions d'affleurement, et conditionnées par une érosion dont il n'est pas toujours possible de connaître l'ampleur, elles permettent de préciser les conditions de mise en place des massifs. Une incertitude demeure cependant concernant la dimension et la forme de la racine de ces extrusions endogènes.

a) Tholoïdes (fig. 11)

Le groupe des Tholoïdes rassemble les formes en bulbes ou en coupoles. Ils sont dûs à l'extrusion sur place d'une masse très visqueuse avec un très faible débordement latéral. Ce groupe est typique des trachytes; la structure est alors difficile à mesurer et la forme nettement arrondie (*Ht. Alliès, Menoyre, Augoules*). Les phonolites présentent également ce type d'extrusion, mais la forme est alors plus souvent ellipsoïdale (*Roche, Cournil, Griou, Taillade*).

b) Conodômes (fig. 12 et 13)

Le groupe des conodômes est le plus fréquent, et bien des massifs présentent une structure de dôme complexe: *dôme-lame* ou *dôme-coulée*.

Le Massif d'Anteroche constitue un exemple de *dôme-lame* (fig. 12) tandis que ceux de *Vinsac*, de *Ribes-Milhac* (fig. 13), d'*Urlandes*, et de *Bort les Orgues*, constituent des *dômes-coulées* typiques.

c) Lames et murs

Les lames sont des extrusions verticales de structure planaire et de morphologie allongée.

Nous en avons décrit à *Chastanat* (lame verticale) et à *Roche Pointue* (lame oblique). Elles sont extrêmement fréquentes et peuvent atteindre des dimensions importantes dans le centre du Cantal (*filon de la Jarrigue*, de 2.500 m de long; filon du *col de Roche Noire*, de 200 m de hauteur au moins visible à l'affleurement). Leur épaisseur varie de 5 à 20 m.

d) Aiguilles

Il semble que le massif d'*Aldis* ait pu constituer une aiguille antérieurement aux dernières émissions basaltiques et au démantellement glaciaire, mais la difficulté de mesures de structure rend cette affiliation peu étayée.

e) Ensemble extrusif complexe (fig. 14)

L'ensemble de *Vinsac* constitue un massif phonolitique complexe, une coulée phonolitique à amphibole y a précédé la mise en place d'un dôme-coulée de phonolite à pyroxène (structure complexe en coulée, dôme-coulée).

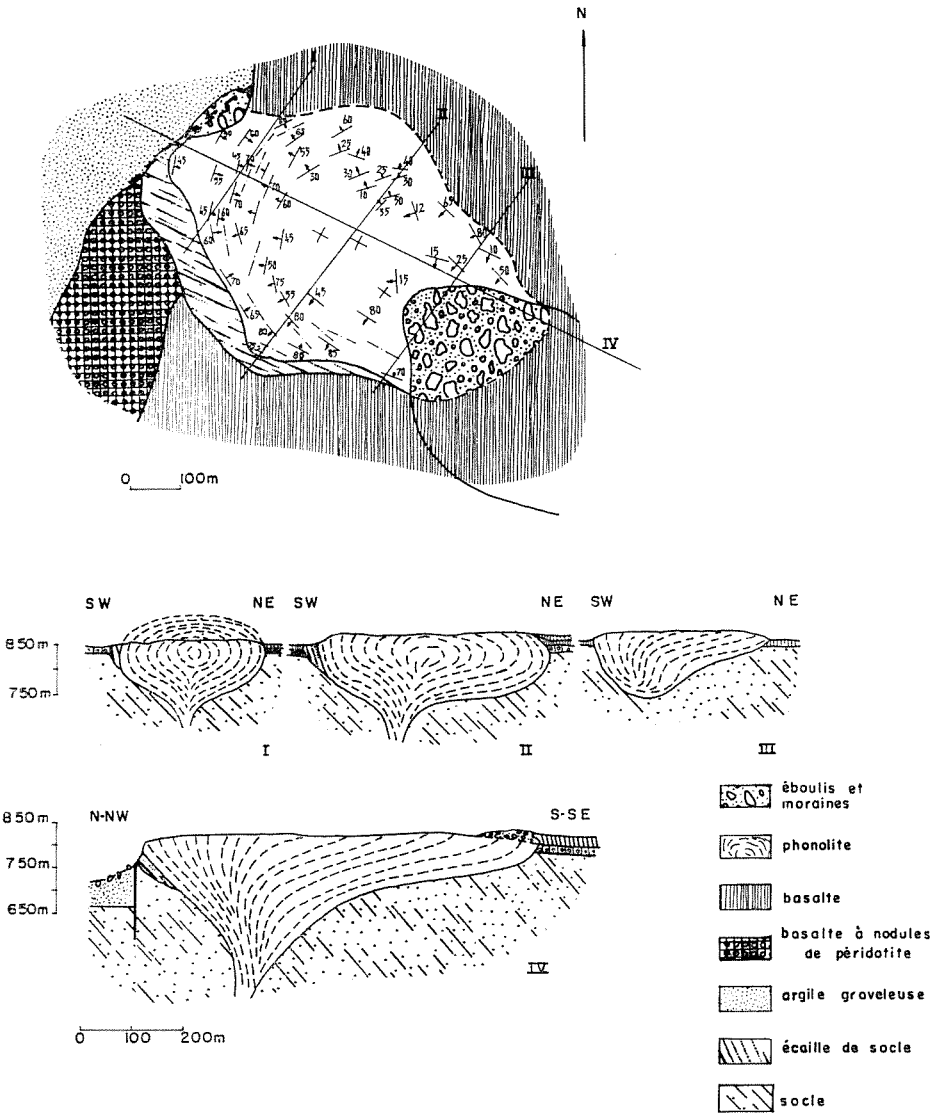

Fig. 12. Carte structurale et coupes du massif d'Auteroche. Il s'agit d'un dôme passant à une lame oblique. (Dôme décroché au Nord.)

2. Influence morphologique de l'encaissant sur la structure du dôme (fig. 15)

Il est certain que l'encaissant influe, par un «filetage» sur la structure du dôme. Nous avons relevé ce phénomène pour presque tous les dômes

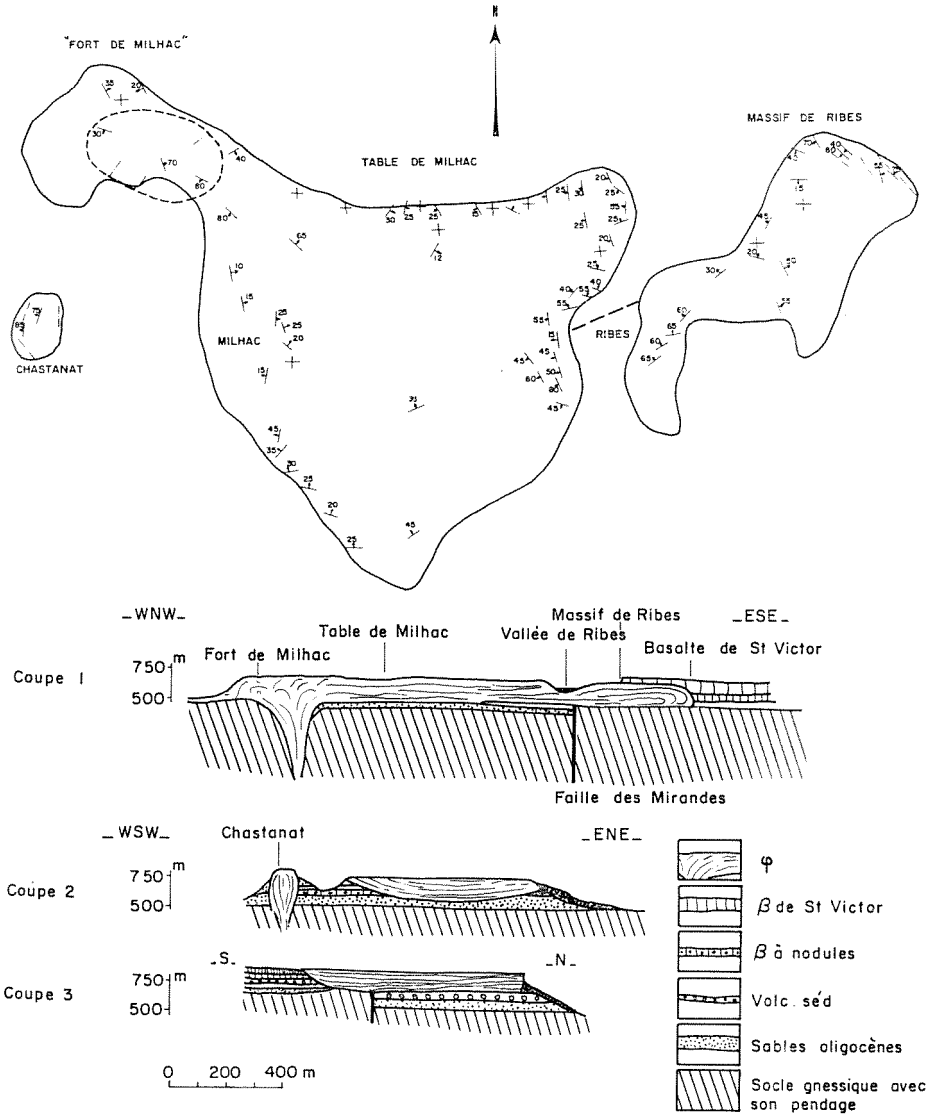

Fig. 13. Dôme-coulée de Ribes-Milhac. Carte structurale et coupes interprétatives, utilisant les mesures de pendage et les données de la fig. 6.

(Varet, 1967), du Cantal Septentrional, qui traversent un socle métamorphique redressé.

a) Conformité du pendage des lauzes au sein du dôme, avec celui des roches métamorphiques du socle au contact. Ce phénomène a été observé à *Auteroche* et à *Roche*.

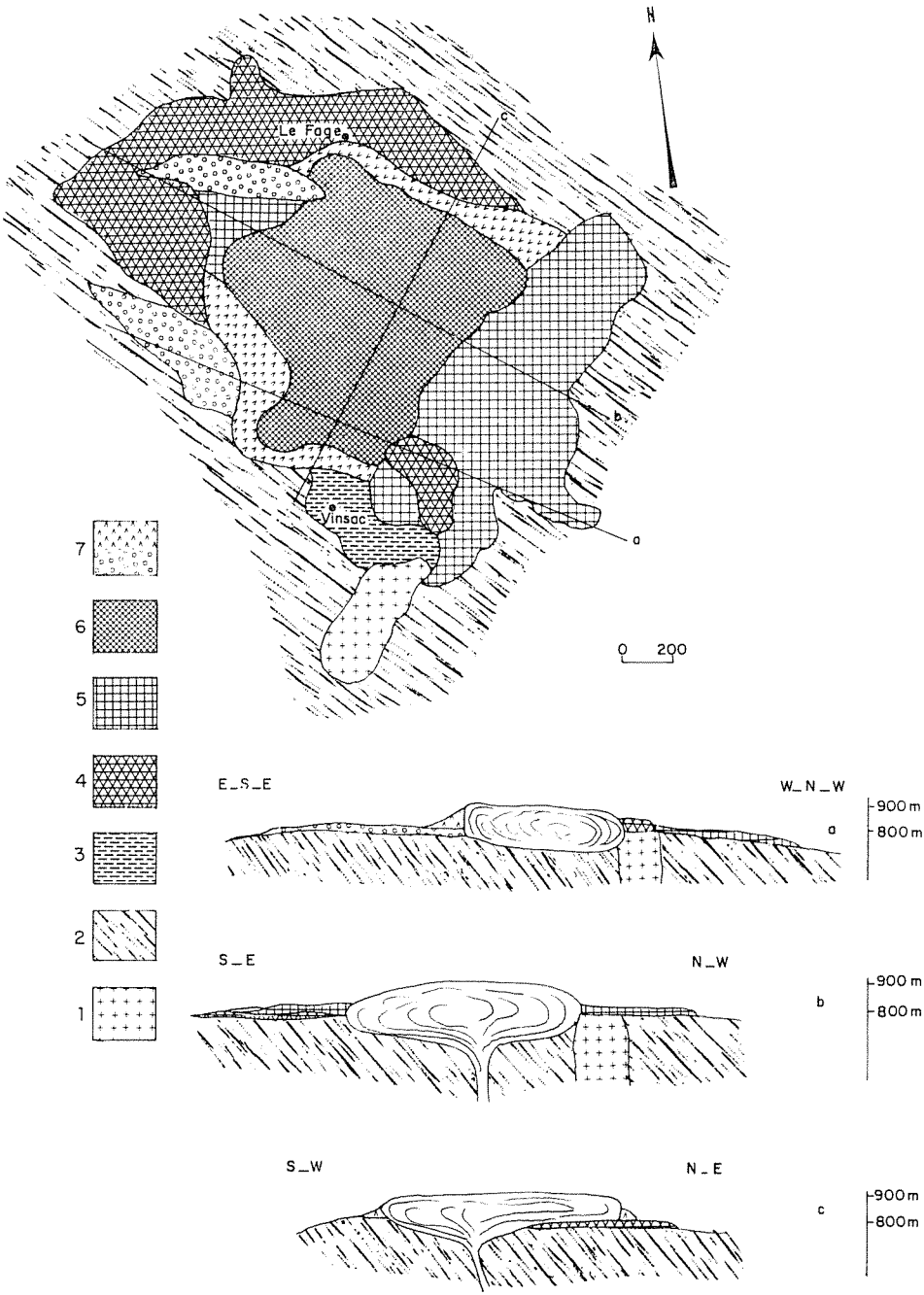

Fig. 14. Carte structurale schématique du massif complexe de Vinsac. Une coulée phonolitique à amphibole (5) est surmontée par un dôme-coulée de phonolite à pyroxène (6). (1) Granite, (2) gneiss, (3) basalte miocène, (7) êboulis et moraine.

b) Allongement préférentiel du dôme suivant la direction de moindre résistance du socle (plan de schistosité). Ce phénomène est observé à *Auteroche*, à *Roche*, à *Vinsac* et à *Augoules*.

c) Décrochement de la lame extrusive ou de la coulée du côté de moindre résistance (pendage inverse) de l'encaissant. Ce phénomène est observé à *Auteroche*, *Vinsac Est* et *Milhac*.

d) Limitation d'un épanchement à cause d'un obstacle comme nous l'avons observé à *Vinsac Sud* (granite) ou à *Chastanat* (coulée basaltique).

e) Une couverture flexible pourrait influer sur la mise en place du dôme, celui-ci restant caché sous cette couverture (crypto-dôme) ce cas n'est pas observé à notre connaissance dans le Cantal septentrional.

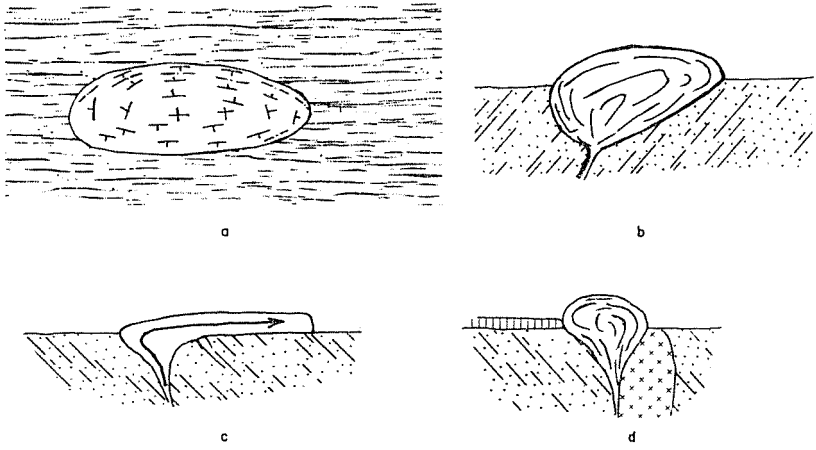

Fig. 15 Schémas illustrant l'influence de la structure de l'encaissant sur la forme du dôme phonolitique. Les lettres renvoient aux § du texte.

3. Relation entre mode de mise en place et caractéristiques de la lave

La mise en place sous forme de mur, lame, dôme, aiguille ou coulée est en relation étroite avec la composition chimique de la lave, mais d'autres facteurs peuvent également être importants.

La composition chimique des phonolites est en relation étroite avec leur viscosité. Ainsi les phonolites les plus alcalines sont également les plus visqueuses, tandis que la viscosité décroît lorsque leur composition se rapproche de celle des téphrites (communication personnelle F. GAUTHIER [4]). On observe que les coulées sont limitées aux phonolites sub-

[4]) A 1.450° C, la viscosité des phonolites du Cantal est la suivante (F. GAUTHIER, à paraître):

Cournil (phonolite agpaïtique) 3.460 poises.
Aldis (phonolite miaskitique alcaline) 1779 p.
Roche (phonolite miaskitique) 1529 p.
Urlandes (phonolite miaskitique) 1295 p.

alcalines (*Bort, Ribes, Milhac*), tandis que les phonolites agpaïtiques ne donnent que des dômes de très faible extension latérale ou des lames (*Cournil, Auteroche, Roche Pointue* etc.). Les phonolites miaskitiques constituant les types intermédiaires.

Outre la morphologie de l'encaissant, déjà discutée, le volume de matière épanchée influe également sur la forme finale de l'extrusion. Ainsi certaines lames de faible épaisseur (*Chastanat* par exemple) sont limitées parce que le volume de magma émis était lui-même réduit.

La température de l'extrusion, ainsi que la teneur en gaz jouent sans doute également un rôle important. Les observations effectuées ne permettent pas de trancher sur ce point. Il semble cependant que les deux facteurs décrits suffisent pour expliquer les variations morphologiques essentielles des massifs du Cantal.

4. Synthèse sur le mode de mise en place des dômes

Les extrusions alcalines sont fréquentes dans les zones de volcanisme des plates formes continentales et des iles océaniques.

Ce type d'émission volcanique a été discuté au début du siècle (POULETT SCROPE, 1860; BERGEAT, 1907; LEYDEN, 1936).

Les études géologiques plus récentes dans le Velay (MERGOIL, à paraître), le Tibesti (VINCENT, 1963), le Hoggar (ROGNON, 1967), le Texas, l'Iran, le Tigré etc., les îles de Sainte-Hélène, de Gough, de l'Ascension et de Pantelleria (VILLARI, 1968) etc., permettent de préciser le mode de mise en-place des extrusions endogènes.

Précédant la montée du magma, la poussée des gaz est sans doute responsable de l'éparpillement d'une partie des roches encaissantes. Ces projections se retrouvent aux alentours des dômes en particulier autour de *Haut-Allies,* mais ne sont le plus souvent pas observables. Il est difficile de savoir si leur absence est dûe au fait qu'ils n'ont jamais existé (extrusion sans phase explosive) ou à leur érosion. Cette phase a été observée à la Montagne Pelée par LACROIX (1904). Elle est considérée par R. RITTMANN (1967) comme précédant systématiquement les extrusions de dômes.

La mise en place sous forme de dômes, lames (toujours petits) ou de coulées (plus larges) semble être essentiellement déterminée par la quantité et la qualité du magma à la gueule de sortie.

Il est par contre difficile de déterminer la profondeur de l'ancrage des dômes, et de connaître le diamètre du canal de montée de la lave. Tout au plus est-il supérieur à celui des enclaves homoégènes (sanidinites d'un mètre de diamètre à *Menoyre,* syénites néphéliniques de 30 cm à *Brocq*).

Signalons en concluant que l'observation volcanologique de la mise en place de dômes est rare. Rappellons celle de LACROIX à *la Montagne* Pelée:

«La lave s'accumule sur place, se solidifiant immédiatement à sa périphérie, s'entourant ainsi d'une carapace. Celle-ci augmentant considérable-

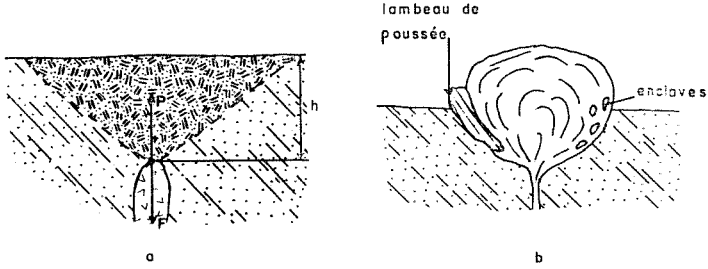

Fig. 16. Schémas illustrant le processus de mise en place des dômes phonolitiques. En *a* explosion précédant la montée du magma éparpillant l'encaissant sur une hauteur *h*, lorsque la poussée du magma *p* est égale à la résistance *f* de l'encaissant. En *b* autres phénomènes expliquant «l'ancrage» des dômes, l'encaissant se retrouvant partiellement en enclaves ou en lambeau de poussee.

ment aux dépens de la partie centrale encore pâteuse a été aussitôt fissurée par le retrait dû au refroidissement superficiel, et par la poussée interne qui, sans cesse, tendait à faire éclater cette enveloppe trop étroite . . . et cet auteur ajoutait:

«*Une semblable origine me paraît très vraisemblable pour un certain nombre de dômes phonolitiques du Cantal . . .*»

Bibliographie

D'Albissin, M., & Robert, M.: Appréciation du dégré de déformation naturelle des roches calcaires au moyen du diffractomètre à rayons X. — C. R. Ac. Sc. Paris, **254**, 1123—1125, 1962.

Arkai, P.: Correlation of rate of cooling, texture and mineralogical composition in the pyroxene andesite complex of the Eserhat hills. — Acta geol. Acad. Sci. Hungaricae, **12**, 11—30, 1968 a.

—: Fabric and jointing in pyroxene andesites. Eserhad hills. — Northeast Hongary — Ann. Un. Sc. Budapest, **XII**, 3—18, 1968 b.

Beard, C. N.: Quantitative study of columnar jointing. — Geol. Soc. of America, Bull., **70**, 379—381, 1959.

Bergeat, A.: Staukuppen. — Neues Jb. f. Min. Festband, 310—329, 1907.

Berger, E.: Le volcanisme des Causses lozeriens. — Dipl. Et. Sup. Pétrographie, Orsay, 74 p., 1964.

Brousse, R.: Observation sur les dykes et leur prismation. — C. R. Congr. Soc. Sav 90è Sess., Nice, **2**, 235—260, 1965.

Cloos, H., & Cloos, E.: Die Quellkuppe des Drachenfels am Rhein. Ihre Tektonik und Bildungsweise. — Z. f. Volc., **II**, 33, 1927.

Girod, M.: Mode de mise en place des protusions de l'Atakor. — C. R. Somm. Soc. Géol. Fr., **2**, 86—87, 1964.

Goguel, J.: Le mécanisme de l'orientation des minéraux dans les roches métamorphiques. — C. R. Ac. Sc. Paris, **260**, 6145—6147, 1965.

Iddings, J. P.: The columnar structure in the igneous rocks on orange Mountain, New Jersey. — Amer. J. Sci., **131**, 321, 1886

Klüpfel, W.: Basalt geologie. — Z. d. Dtsch. Geol. Ges., **104**, 1886.

KRATKY, O.: Ein Röntgenogoniometer für die Polykristalluntersuchung. — Z. Kristallog., **72**, 529—540, 1930.

LACROIX, A.: La montagne Pelée et ses éruptions. — 662 p., 30 pl., Paris (Masson) 1904.

VON LEYDEN, L.: Staukuppe und verwandte Bildungen, ein Beitrag zur vulkanologischen Systematik auf genetischer Grundlage. — Z. f. Verlk., **1 b**, 225—247, 1936.

LOTHE, F.: Utilisation d'un diffractomètre de texture pour la détermination des orientations cristallines des roches microgrenues. — Mem. Fac. Sc. Univ. Nancy, 18 p., 1968.

MACDONALD, G. A.: Forms and structures of extrusive basaltic rocks. — In: Basalts, Willey, **1**, 1—62, 1967.

MICHELUCCINI, M.: Observations préliminaires sur l'anisotropie mécanique des ignimbrites de Toscane. — Bull. Volc., **XXV**, 327—342, 1963.

POULETT-SCROPE, G.: Mémoire sur le mode de formation des cônes volcaniques et des cratères. — 82 p., Paris (Mallet Bachelier) 1860.

RITTMANN, A.: Les volcans et leur activité. — Paris (Masson et Cie) 1963.

ROGNON, P.: Le Massif de l'Atakor et ses bordures (Sahara central). — Ed. C. N. R. S., 562 p., 32 pl., 1967.

RUTTEN, M. G.: Acid lava flow structure. — Bull. Volc., **25**, 111—121, 1963.

SANDER, B.: Über Zusammenhänge zwischen Teilbewegung und Gefüge in Gesteinen. — Tockermacks Mitt., **30**, 281—315, 1911.

SMALLEY, I. J.: Contraction cracks networks in basalt flow. — Geol. Mag., **103**, 110—114, 1966.

SPY, A.: The origin of columnar jointing, particularly in basalt flow. — Geol. Soc. Australia Journ., **8**, 191—216, 1962.

SZÖKE, A.: Petrofabric analysis of magmatic rocks in the area of the Carpathian Tertiary volcanism. — Acta géol., **10**, 1966.

THOMSON, J.: On the origin of the jointed structure in basalts and other igneous rocks. — Trans. Brit. Ass. Adv. Sci. 33è meeting Newcastle, **89**, 1863.

TOMKIEFF, S. I.: The basalt lavas of the giant's Causeway district of Northen Ireland. — Bull. Volc., **18**, 89—143, 1940.

VARIN-PERIGNON, N.: Petrographie et Minéralogie des roches volcaniques et description géologique de la partie centrale du massif Cantal. — Thèse Fac. Sc. Grenoble, 359 p., 1966.

VARET, J.: Contribution à l'étude de la dimension des minéraux dans les roches. — C. R. Somm. Soc. géol. Fr., **3**, 109—110, 1967 a.

—: Grenats andradites developpés sur les plans de fracture du trachyte de Menoyre (Cantal). — Bull. Soc. Fr. Miner. Crist., **XC**, 102—106, 1967 b.

—: Les trachytes et les phonolites du Cantal. Septentrional. — Thèse 3è cycle, Orsay, 354 p., 1967 c.

—: Les pyroxènes des phonolites du Cantal (Auvergne, France). — N. Jb. Miner. Mh., **4**, 174—184, 1969.

—: Les dômes phonolitiques marqueurs du deplacement des glaciers cantaliens, VII. congr. INQUA, Paris. — Annales de geographie, 277—291, 1970.

VINCENT, P.: Les volcans tertiaires et quarternaires du Tibesti occidental et central. — Thèse, Mem. B. R. G. M., **23**, 197 p, 1963.

VILLARI: On the geovolcanologic and morphological evolution of an endogeneous dome (Pantelleira). — Geol. Rdsch., **57**, 784—795, 1968.

WATERS: Determining direction of flow in basalts. — Amer. Journ. Sci., **258 A**, 350—366, 1960.

WENK, H. R.: Eine gefüge Röntgenkamera. — Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt., **43**, 2, 699—725, 1963.

WILLIAMS, J. F.: Über der Monte Amiata in Toscana und seine Gesteine. — Neues Jb. Min. geol. Pal., Festband, 1887.

WILLIAMS, H.: The history and character of volcanic domes. — Univ. of Calif. publ., Bull Dept. geol. Sc., **21**, 51—146, 1932.