

LES RHYOLITES DE L'ESTÉREL (2^E PARTIE) :

LES RHYOLITES FLUIDALES

Dominique Rossier, animateur de la Commission de Volcanisme de la SAGA.

Introduction

Nous avons décrit dans *Saga Information* n° 366 (septembre-octobre 2018), les observations pétrographiques faites sur les **rhyolites ignimbritiques**, du Permien de l'Estérel, les célèbres rhyolites amarantes, rapportées de voyages d'étude de la SAGA (Rossier, 2018). Nous exposons également le cheminement expérimental qui nous avait conduits à mieux comprendre le sens de ce terme, quelque peu mythique, d'ignimbrite.

La question des ignimbrites est née à l'occasion de l'éruption du Novarupta, en Alaska, du 6 au 8 juin 1912 (la mythique « Vallée des 10 000 fumées »). Elle a fait l'objet de débats passionnés pendant un bon demi-siècle et nous en retracons l'historique en cinq actes. Cependant, la dynamique éruptive elle-même, qui préside à la formation et à la mise en place de ces immenses nappes, est rarement observable directement. Aucune observation directe ne peut être faite sur l'état physique de la matière qui sort des points d'émission; on sait seulement que c'est un état très particulier d'émulsion brûlante de gaz et de liquide magmatique siliceux. Tout est déduction, à partir des observations des débris de cette émulsion, tels qu'ils nous apparaissent sous le microscope. Ces observations sont également décrites en détail dans le chapitre Estérel de l'Atlas pétrographique de la SAGA, accessible sur le site Internet de l'association.

Cependant, le site de l'Estérel permet la découverte d'un autre état physique des rhyolites émises au Permien, celui des **rhyolites fluidales**¹. Ces émissions ont une extension plus réduite sur le terrain, comparée au domaine envahi par les rhyolites ignimbritiques lors des émissions paroxysmiques du Permien. Elles sont de nature lavique, contrairement aux ignimbrites. Leur émission ne peut se faire que si le magma, au sommet de la chambre magmatique, a été substantiellement dégazé; donc elle est postérieure à celle des grands épanchements d'ignimbrites à partir des failles

bordières. Elle en est même séparée par une phase de repos d'environ 10 à 20 Ma, suivie par une période de construction d'édifices et de violentes éruptions pliniennes. Ce n'est qu'après le dégazage assez complet du magma, puis le débouchage des cheminées (brèches de projection), que les dômes de rhyolites fluidales se mettent en place. La datation a donné 253 ± 10 Ma (notice de la carte géologique Cannes-Fréjus, Toutin-Morin *et al.*, 1994).

Une seconde condition est requise pour que s'exprime cet épisode: elle touche la composition du magma en grande partie dégazé. Pour qu'un écoulement se produise, le magma correspondant ne doit pas être trop visqueux, et sa température de cristallisation doit être la plus basse possible. Réciproquement, le mélange à l'état solide de même composition, présenterait un point de fusion éventuellement minimum: c'est l'*eutexia* d'Aristote, qui a donné dans le vocabulaire scientifique le terme **eutectique** (figure 1). Ce dernier point sera développé dans la partie interprétation de l'article; il est fondamental, puisqu'il est associé à cette propriété qu'ont les magmas complexes d'avoir un minimum de température de cristallisation dépendant de façon très sensible de la composition.

C'est le caractère lavique et la dynamique éruptive associée, somme toute classique, qui ont retenu l'attention, dès la découverte de ces rhyolites au début du XIX^e siècle, bien avant celle des ignimbrites (voir ci-dessous l'aspect historique).

Nous verrons en effet que leur pétrologie est différenciée par rapport aux rhyolites ignimbritiques, et leur composition chimique légèrement décalée, principalement le taux de silice. La différence pétrographique vient de l'état physique lavique bien particulier, non pyroclastique.

De plus, il est marqué par une cristallisation systématique, qui s'est produite au moment de l'émission et du refroidissement sous forme de **sphérolites** qui confèrent un caractère original à l'échelle microscopique

Eutexia. Propriété qu'a un mélange de se fondre aisément. La première mention du phénomène d'eutexie est attribuée à Aristote (384 – 322 av. J.-C.), dans l'ouvrage *Problemata physica*. Mais il s'agit en fait d'un « faux Aristote », et le nombre d'ouvrages mis sous le nom d'Aristote, sans qu'il en soit l'auteur, est immense!

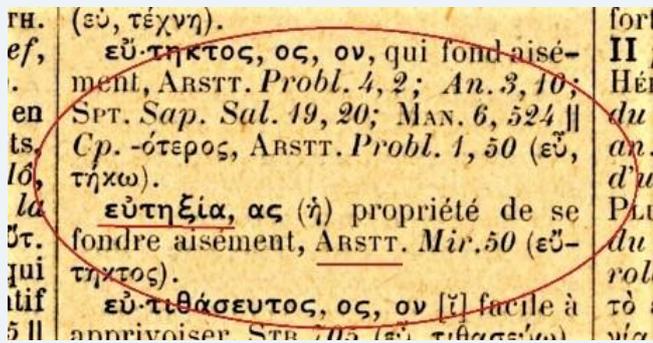


Figure 1. Eutexia, observation mise sur le compte d'Aristote² (ARSTT. dans le texte), a donné **eutectique** : « qui fond bien » ! Dictionnaire Grec-Français, Bailly.

Dans cet article, nous décrivons les affleurements que nous avons observés lors des voyages d'étude en Estérel (mai et octobre 2013), et les recherches pétrographiques faites au microscope. Elles portent principalement sur la composition et sur la structure felsitique³ de ces roches, et sur leur texture microcristallisée (et non pas dévitrifiée⁴, voir Crevola, 2010). L'interprétation de ces structures et textures a évolué à la faveur des travaux les plus récents. Aussi les observations rapportées dans cet article ont pour but de l'éclairer, et aussi d'établir le lien critique avec la composition de la lave et la notion d'eutectique.

Rhyolites fluidales, porphyres globaires, pyromérides : un peu d'histoire

Les premiers auteurs ont baptisé ces rhyolites laviques du curieux nom de « **pyroméride** », du grec *puros* feu et *meros* partie, ce qui n'aide guère à l'interprétation ! Comme le raconte Gilbert Crevola dans sa synthèse sur le volcanisme rhyolitique de l'Estérel (Crevola 2010), le nom a été proposé pour la première fois par Haiüy lui-même, à qui on avait apporté des porphyres dits globuleux ou « globaires » de Corse (Monteiro, 1814). Les « globes » sont de gros agrégats fibroradiés sphériques de feldspath et de quartz, centimétriques. De nos jours, ces agrégats sont désignés par le terme **sphérolite** (*spherulite* en anglais). Cependant, le nom archaïque de pyroméride ne doit plus être utilisé pour les rhyolites laviques de l'Estérel. De plus, nous allons voir que leurs

sphérolites ne sont pas centimétriques mais bien plus petites : leur diamètre ne dépasse pas 1 mm !

La place des rhyolites fluidales dans l'Estérel

Elles ont été étudiées au siècle dernier par des géologues dont les noms nous sont familiers : le premier est Michel-Lévy (1912), dont nous utilisons toujours la méthode de détermination de la composition des plagioclases ; puis par Bordet (1951), le même qui avait élucidé avec Haroun Tazieff la nature physique des émissions d'ignimbrites de la Vallée des 10 000 fumées (voir le précédent article de *Saga Information*, 366, Rossier, 2018).

La référence aujourd'hui, pour les volcanites de l'Estérel, est la thèse de M. Boucarut (1971) qui éclaire le sujet au travers de concepts volcanologiques modernes.

11p	Φ<5%	Pyroméride	50 m
10p	Φ<5%	Piperno, FL	200 m
9p	Φ<5%	Ign	100 m
8p, 9p		Pyroméride	5 m
7p	Ign Φ=40 à 50%		150 à 300 m
6p			3 m
5p	Ign Φ=30 à 40%		0 à 150 m
2p	Φ=10 à 15%	Ign	20 à 30 m
1p	A	FL	2 à 5 m

Figure 2. Pourcentages en volume (Φ) de phénocristaux de quartz et de feldspath potassique, dans la série qui va des tufs d'ignimbrites notées 1p à 10p, jusqu'à la rhyolite fluidale (pyroméride) terminale 11p.

Φ est un indicateur de la pression partielle de vapeur d'eau dissoute dans le magma.

Symboles : **Ign** = ignimbrite. **FL** = flammes.

Les rhyolites fluidales sont de véritables laves au sens classique, homogènes et peu vésiculaires. Elles se sont épanchées en coulées et en nappes très visqueuses, après la phase paroxysmique des ignimbrites qui a conduit à la libération d'une bonne partie des gaz occlus dans le magma, essentiellement

de la vapeur d'eau. Elles sont donc moins riches en eau que les coulées de rhyolites ignimbritiques, et très sensiblement moins chargées de phénocristaux de quartz et de feldspath : voir le schéma de la colonne stratigraphique de la figure 2, établie d'après la notice de la carte géologique à 1/50 000, feuille 1024 (Fréjus-Cannes). La lettre grecque ρ (rho) indiquée de 1 à 12, désigne les niveaux successifs de rhyolite⁵.

Les rhyolites fluidales abondent sous la forme de petits dômes et dômes-coulées indépendants les uns des autres, mais néanmoins contemporains. Ils sont en général voisins des failles orientées est-ouest, qui marquent de leur empreinte le massif et dont l'origine est la tectonique extensive de cette période du Permien (figure 3).

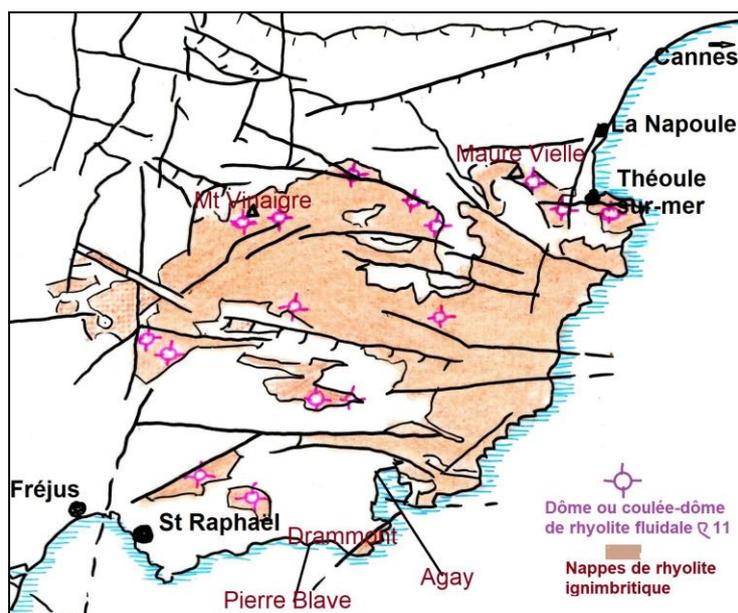


Figure 3. Carte schématique des rhyolites ignimbritiques de l'Estérel, entre Saint-Raphaël et La Napoule. Les sites d'émission de rhyolite fluidale IIρ les plus importants sont indiqués, comme Maure Vielle, mont Vinaigre et Théoule sur-Mer⁶. Les nappes d'ignimbrite se sont déversées à partir des faisceaux de failles dans le fossé d'effondrement du Permien. Celui-ci est comblé par d'épaisses couches de grès, de conglomérats et de dépôts volcano-sédimentaires du Permien. Dessin D. Rossier d'après le schéma structural, publié avec la carte géologique, feuille de Fréjus-Cannes à 1/50 000 (Toutin-Morin et al., 1994).

Notre présentation pétrographique portera sur les affleurements remarquables, au sommet et sur les flancs du mont Vinaigre. Les lames minces sélectionnées, correspondant aux affleurements, sont décrites en détail dans l'Atlas pétrographique de la SAGA, accessible pour tout public sur le site de l'association.

Affleurements de rhyolites fluidales au mont Vinaigre (massif de l'Estérel)

Le principal affleurement connu, et souvent décrit dans les articles consacrés au volcanisme rhyolitique de l'Estérel, se trouve au voisinage du sommet du mont Vinaigre, point culminant de l'Estérel (figure 4).

Le second se trouve en bordure de la piste qui conduit au sommet. Voir la carte IGN avec les repères des prélèvements (figure 5a et tableau 1) et le schéma géologique (figure 5b).

Les repères qui nous intéressent sont les repères **b** et **f**, surlignés sur le tableau. Les deux prélèvements diffèrent par leur origine dans le processus éruptif ; voir également la coupe de la figure 6. Il est également possible d'observer des fragments (épicles) de rhyolite fluidale dans les pélites « lie de vin » de la Pointe de Pierre Blave, en bordure de mer. Ces pélites sont au sommet de la formation détritique permienne de l'Estérel.



Figure 4. Vue sur le massif du mont Vinaigre. On aperçoit la tour du sommet et sur la gauche le relais hertzien. La vue est prise depuis le repère a sur la carte de la figure 3. Au premier plan, un affleurement d'ignimbrite⁷ Cliché Y. Grimault.

Coupe du mont Vinaigre

Pour accéder au dôme du mont Vinaigre (figure 6), il faut franchir un petit couloir orienté nord-sud, entre deux parois de brèches rhyolitiques (⁹ρ). Il est occupé par un dyke de rhyolite fluidale (¹¹ρ) : c'est la cheminée d'alimentation de l'appareil extrusif du mont Vinaigre. À leur tour, les brèches sont séparées du dôme par une faille que le sentier franchit.

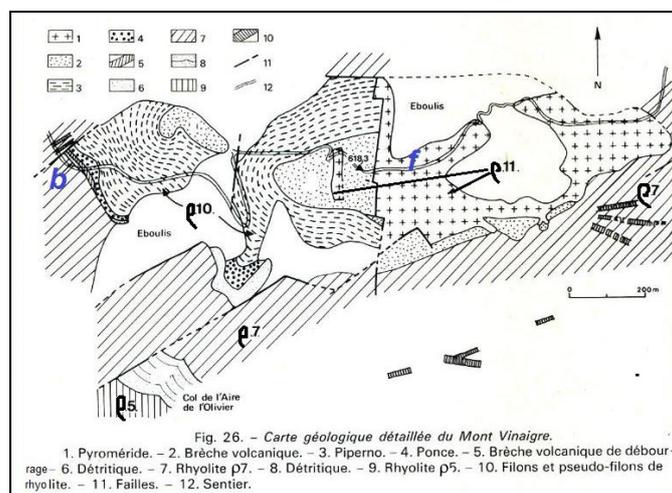
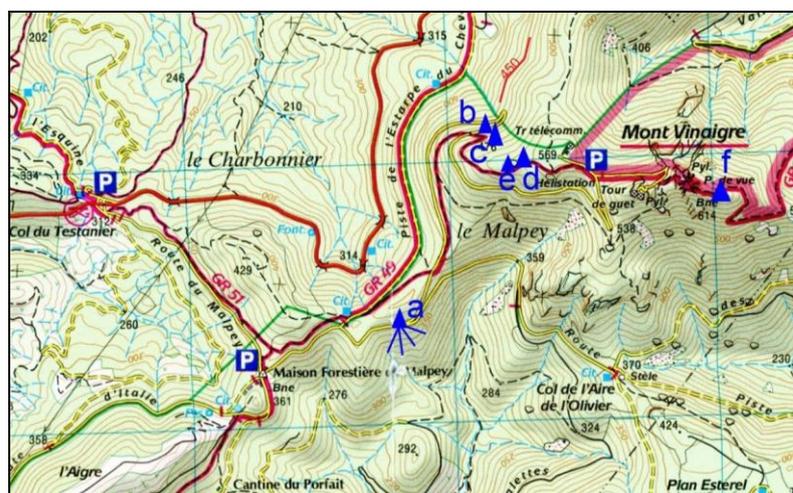


Figure 5a. Extrait de la carte IGN avec les repères des prélèvements de rhyolites.

5b. Schéma tiré du Guide Masson de l'Estérel (Campredon et Boucarut, 1975), montrant les différents niveaux de nappes (piperno 10p) ou de brèches ignimbritiques traversées par la piste et le sentier, avant d'arriver au sommet et au dôme de rhyolite fluidale (11p, repère f).

Tableau 1. Les échantillons des repères a, c, d et e ont été décrits dans l'article précédent, Saga Information n° 366 (Rossier, 2018).

Repères des prélèvements sur la piste puis le sentier du mont Vinaigre	Nature de la roche prélevée
a : parking au-dessus de la maison forestière du Malpey, alt.= 350 m	⁷ p : rhyolite ignimbritique
b : N 43.502 15, E 006.811 78. Altitude = 497 m	Brèche de débouillage de la cheminée du volcan (cliché de la figure 12), avec gros blocs de ¹¹ p : rhyolite fluidale
c : N 43.502 15, E 006.811 78. Altitude = 497 m	Coulée recouvrant la brèche de débouillage (cliché de la figure 12). ⁷ p : rhyolite ignimbritique
d : altitude = 550 m	¹⁰ p : piperno rhyolitique, flammes aphyriques à cœur de ponce
e : vers 500 m	⁷ p : rhyolite ignimbritique, lie de vin,
f : voisinage du sommet à l'alt. = 605 m, après la faille (voir coupe figure 6)	¹¹ p : rhyolite fluidale

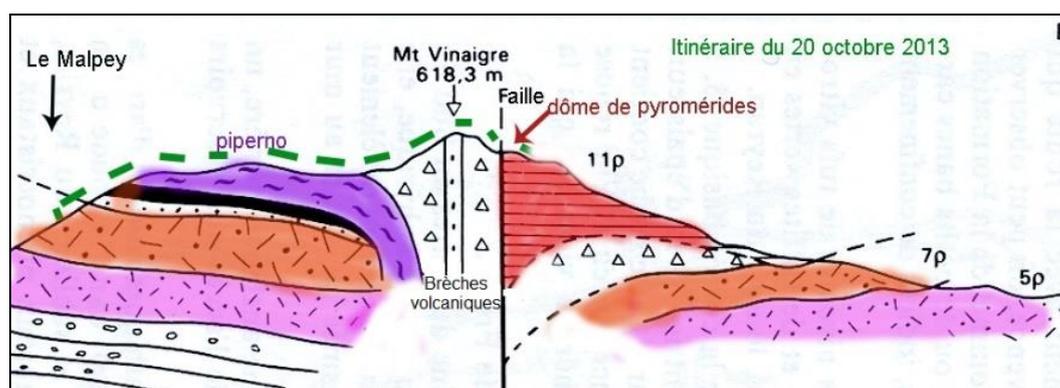


Figure 6. Coupe ouest-est de l'appareil du mont Vinaigre, montrant la disposition relative des nappes et brèches d'ignimbrite par rapport au dôme extrusif de rhyolite fluidale (noté pyroméride sur la coupe).

Le principal affleurement, au voisinage du sommet du mont Vinaigre (repère f)

À 605 m d'altitude, il se découvre juste après avoir franchi la faille indiquée sur la coupe de la figure 6. Le sentier parcourt le sommet du dôme formé par la coulée prismée de rhyolite (figure 7).

À l'affleurement, la coulée présente deux caractères structuraux remarquables et bien visibles :
- d'une part la fluidalité, se traduisant par un litage, lié aux contraintes de cisaillement exercées sur la lave extrêmement visqueuse par l'écoulement. Il est donc en principe parallèle aux surfaces de contact.

Les nappes de lave ont fait extrusion, en couissant avec frottement les unes contre les autres (figure 8). L'orientation moyenne de la fluidalité varie en éventail, en fonction de la position dans le dôme.

La réalité est bien plus complexe : dans le détail, les nappes, rencontrant des obstacles multiples, les contournent par des plis parfois resserrés (figures 10a et 10b) ;

- les nappes de la coulée ont refroidi avec retrait en se prismant, comme le montrent les figures 8 et 9. La structure des prismes est bien visible et sensiblement perpendiculaire ou fortement oblique par rapport à la fluidalité, puisqu'elle est refroidie par la surface de contact de l'extrusion.

Cette géométrie est bien exprimée par le dessin publié par G. Crevola (2010), que nous reproduisons figure 11.

Nous reviendrons, dans le chapitre pétrographie, sur la fluidalité et les déformations subies par la rhyolite au moment de sa mise en place.



Figure 7. Vue vers l'est, depuis la faille, du pointement au sommet du dôme de rhyolites fluidales.

*En arrière-plan, le sommet découpé du strato-volcan de Maure-Vielle.
Cliché Y. Grimault.*



*Figure 8. Sur l'affleurement, les plans de fluidalité ont été mesurés avec une direction sud-ouest/nord-est et un pendage de 45°, avec déversement vers le nord.
(Cliché Y. Grimault).*



*Figure 9. Prismation de la nappe de rhyolite fluidale.
(Cliché Y. Grimault).*



Figures 10a et 10b. Localement, plis serrés dans la nappe de rhyolite fluidale. Clichés Y. Grimault, dessin D. Rossier. L'échelle est donnée par le marteau.

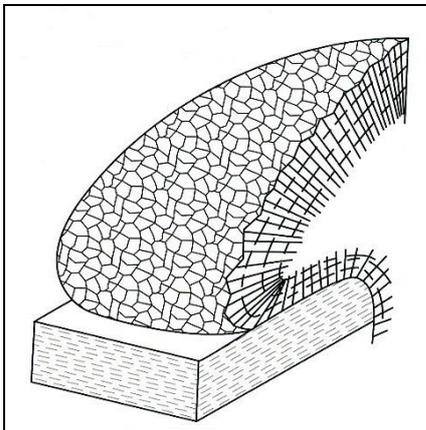


Figure 11. Schéma montrant l'association géométrique entre fluidalité et prismation, ainsi que le serrage localement dans un pli d'écoulement tel que celui visible sur la figure 9. Tiré de G. Crevola (2010).

Second affleurement, sur le bord de la piste (repère b)

Le cliché de la figure 12 donne une idée de ce curieux affleurement dit « de la brèche de débouillage ». C'est un exemple de ce que peut produire une nuée ardente⁷. Celle-ci a été émise lors de l'expulsion explosive du bouchon de rhyolite lavique qui a obstrué momentanément le conduit de la cheminée d'éruption, représenté sur la coupe de la figure 6. Les gros blocs du bouchon de la rhyolite fluidale ont été projetés et entraînés par la nuée. Ils se sont déposés avec les autres constituants pyroclastiques dans la brèche de débouillage.

Nous verrons que les échantillons prélevés sur les blocs de la brèche diffèrent peu de ceux récoltés sur le premier affleurement (dôme), mais sont particulièrement utiles pour la mise en évidence des phénomènes de microcristallisation lors de la mise en place et du refroidissement de la lave dans la cheminée. Les blocs sont intimement soudés au tuf⁸ de la brèche.

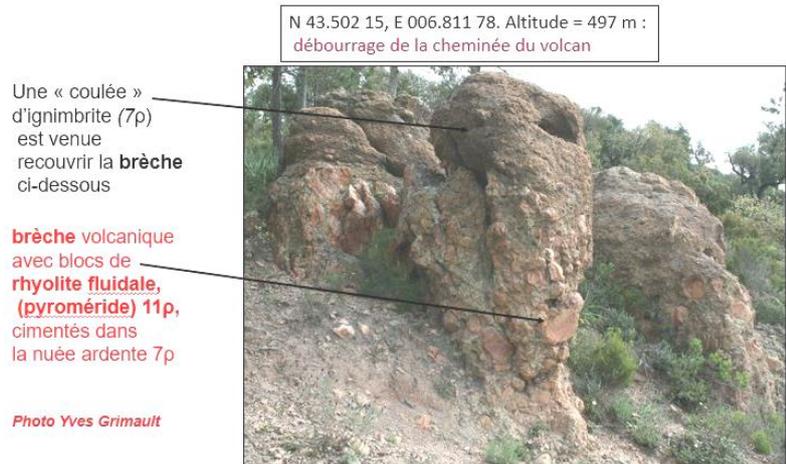


Figure 12. Affleurement dit « de la brèche de débouillage ».

Pétrographie des rhyolites fluidales

Examen de la roche massive

Sur une tranche sciée, la rhyolite fluidale apparaît comme une roche homogène, très peu vésiculaire, d'une belle teinte rose saumon, à grain fin. Elle est parfois nettement marquée par sa fluidalité comme sur les figures précédentes, mais aussi sur les gros

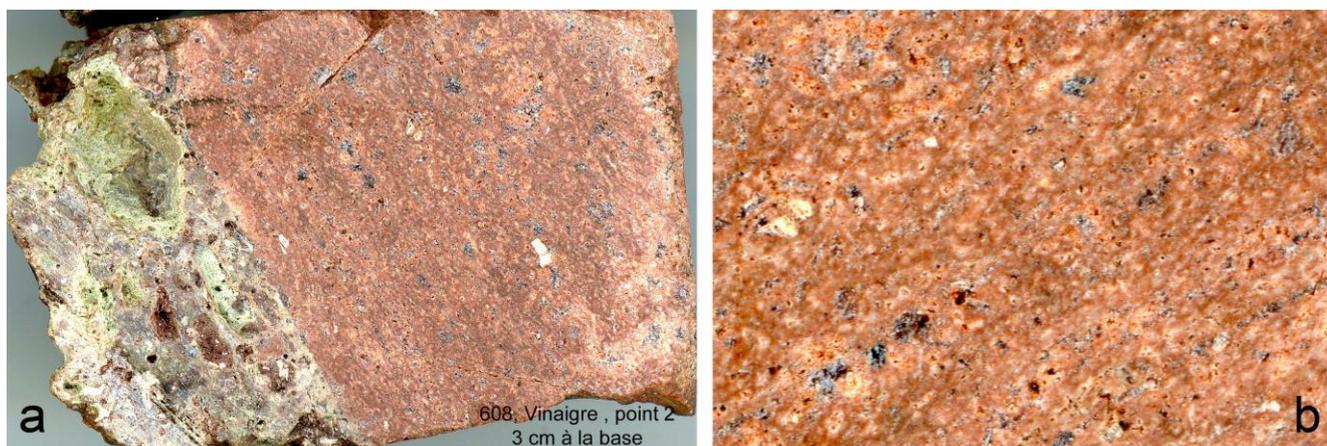


Figure 13a. Le bloc (partie droite), éjecté et emporté dans la nuée ardente, s'est soudé au tuf de la brèche (à gauche). Il est sillonné de minuscules sphérolites et de petits amas allongés sombres dans le sens de la fluidalité. Échelle indiquée sur le cliché.

13b. Détail de la photo a. Deux linéations, angulairement distinctes, apparaissent. Échelle : 1 cm à la base.

blocs de la brèche de débouillage (figure 13). Sur ce dernier affleurement observé à la loupe, on peut observer que les linéations de la fluidalité sont rythmées et jalonnées de petites taches claires serrées. Nous verrons que ce sont les sphérolites. La masse est ponctuée de quelques rares cristaux de feldspath et de quartz.

Examen au microscope, en lumière polarisée, analysée ou non

Phénocristaux

Les phénocristaux⁹ de feldspath potassique (jusqu'à 0,5 cm) et de quartz sont peu abondants. Leur densité en volume est de moins de 1 %, ce qui est très peu, en comparaison des rhyolites ignimbricitiques comme celles du Drammont (Rossier, 2018). Les quartz sont automorphes mais présentent souvent de petits golfes de corrosion, acquis pendant leur séjour prolongé dans le magma à la fin de leur croissance.

Les feldspaths potassiques ont une composition de sanidine, dont les grands prismes allongés sont alignés dans le sens de la fluidalité. La mésostase¹⁰, autour des cristaux de quartz, automorphes et à contours nets, présente le plus souvent une zone abri – ou queue de pression – qui matérialise le sens d'entraînement de la coulée (figure 14).

Mésostase¹⁰

La fluidalité de la roche est illustrée par la structure de la mésostase sur les scans des lames minces en lumière naturelle (lumière polarisée mais non analysée). La structure est rubanée (figure 15), avec alternance régulière entre rubans A et rubans B.



Figure 14. La zone abri – ou queue de pression – se traduit par un sillage clair en forme de triangle, à l'arrière du cristal.

- **Rubans A.** Ils occupent plus de 80 % du volume. La pâte fluidale sombre, à grains très fins, a une apparence vitreuse à grande échelle, mais est en réalité entièrement microcristallisée. Avec des filets plus sombres, alternant avec des filets fragmentaires de quartz pur, tous les deux d'épaisseur millimétrique, alignés dans le sens de la fluidalité : zones **a** et **b** sur la figure 16.

- **Rubans B.** Ce sont des zones d'épaisseur variable, en forme de poches allongées dans le sens de la fluidalité, où des cristallisations de quartz prédominent largement. Pour l'échantillon du repère **f** (dôme), il y a une forte charge de minéraux opaques constitués par

de l'hématite, beaucoup moins abondante dans l'autre échantillon (repère **b**).

Ces zones ont subi un étirement lors de l'extrusion. À leur tour, elles déforment l'écoulement de la pâte à leur voisinage (figure 15). Le quartz libre dans les poches allongées de l'échantillon du repère **b** représente environ 6 ± 2 % du volume total. Attention ! Ce quartz est distinct de celui des phénocristaux ; il a cristallisé simultanément avec les feldspaths lors de l'extrusion et du refroidissement de la lave. Les plages sont souvent faites d'un pavage de quelques cristaux xénomorphes (repère **b**, lame 10 608).



Figure 15. Scan, en lumière polarisée non analysée, de la lame 10 618 (dôme au sommet). Échelle de 3 cm à la base.

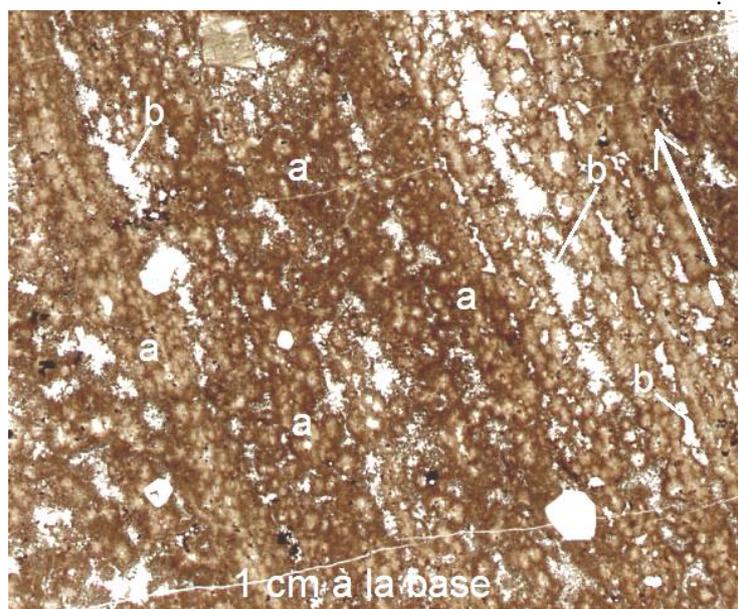


Figure 16. Rubanement avec zones d'alignements en « colliers de perles » de microsphérolites d'orthose pure en **a**. alternant avec des alignements fragmentaires de quartz pur, en **b**. Lame 10 608, brèche de débouillage. L'échelle est reportée sur le cliché.

Nous décrivons maintenant les deux types de rubans, communs aux échantillons des deux affleurements. Leur observation détaillée va nous orienter vers la compréhension des phénomènes produits lors de l'extrusion et la mise en place de ces rhyolites. Ces phénomènes sont mieux exprimés sur les blocs de rhyolite de la brèche de débouillage (repère **b**, lame 10 608), et ce sont ces échantillons que nous utiliserons pour illustrer et présenter l'interprétation. Les blocs du repère **b** ont refroidi à l'intérieur de la cheminée avant d'être expulsés, leur cinétique de refroidissement et de cristallisation est donc nettement plus lente que celle de la coulée du repère **f**.

Rubans A. Description

La texture de la pâte fluidale est felsitique : elle résulte d'un empilement compact de *microsphérolites*, qui sont de très petites sphères fibro-radiées, principalement de fibres d'orthose¹¹ imbriquées avec des quartz squelettiques (figure 17). Les sphères sont de tailles et de formes très régulières. Elles sont constituées d'un très grand nombre de microcristaux d'orthose, à caractère aciculaire, rayonnant depuis le centre. Le quartz est interstitiel entre les aiguilles d'orthose. Les fibres ne sont pas des dendrites, car elles n'ont pas de ramifications latérales.

Les filets sombres sont constitués d'empilements plus ou moins épais de *microsphérolites* d'un diamètre moyen de 0,1 à 0,2 mm. La disposition le long d'une linéation de la fluidalité est si régulière qu'elle évoque la forme de colliers de perles (figure 18).

Le terme de *microsphérolite* est choisi pour indiquer que leur diamètre est inférieur au diamètre, normalement admis dans les articles, d'une sphérolite, soit quelques millimètres. Les fibres de feldspath sont si fines qu'elles sont à peine discernables, d'une épaisseur de quelques micromètres, diffusant fortement la lumière ce qui explique qu'en premier examen la pâte semble vitreuse.

La structure fine, cryptocristalline, de la pâte et la texture aciculaire des microlites d'orthose, s'interprètent par la cinétique de refroidissement rapide du liquide visqueux magmatique en forte surfusion, lors de son extrusion à l'air libre ou dans la cheminée (Ron H. Vernon. 2004, p. 90 à 101, ainsi que p.120). L'amplitude de la surfusion en degrés Celsius a été évaluée par des expériences en laboratoire et atteint des dizaines de degrés.

Les vacuoles, de forme circulaire (figures 19), sont bien repérables, mais leur densité volumique est très faible, de l'ordre de 1/1000. Leur diamètre ne dépasse pas 0,5 mm. Elles sont réparties de façon aléatoire et ne sont donc pas corrélées avec la struc-

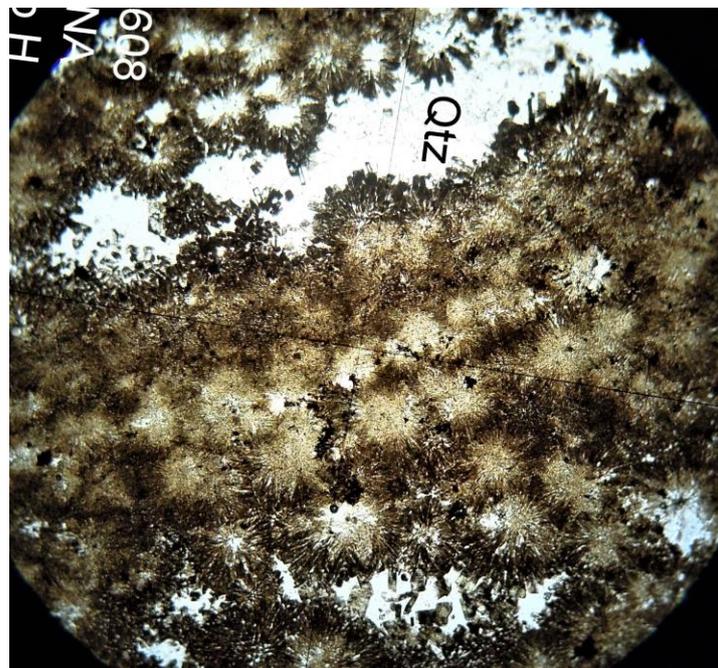
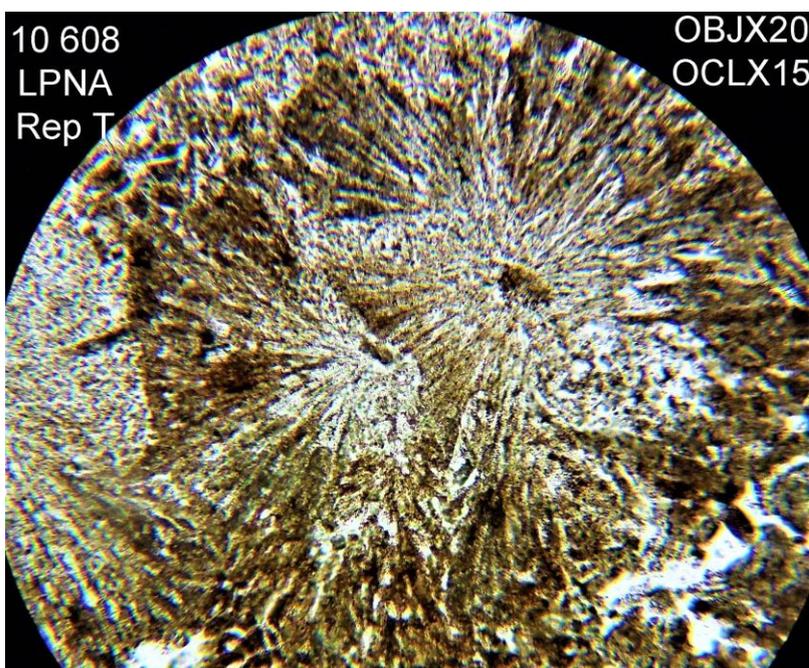


Figure 17 (à gauche). Microsphérolites. Les irrégularités de la forme sont dues à l'empilement compact et à l'imbrication des microsphérolites voisines.

Lame 10 608, brèche de débouillage. Échelle : 0,7 mm à la base.

Figure 18 (à droite). Structure en collier de perles des microsphérolites, dans un ruban sombre entre deux rubans discontinus de quartz.

La teinte des microsphérolites en lumière polarisée non analysée est brunâtre.

Lame 10 608, brèche de débouillage. Échelle : 2,8 mm à la base.

ture rubanée. Ces caractéristiques sont cohérentes avec une valeur modérée de la pression partielle de fluides (H_2O , CO_2 ,...) dans le magma parent réputé dégazé (voir plus haut, le commentaire de la figure 2, portant sur le paramètre Φ).

Rubans B. Description

Au voisinage des rubans de quartz de la mésostase, la texture de la pâte microsphérolitique se modifie brusquement. Les sphérolites à structure fibro-radiée ne sont plus seuls, mais sont accompagnés d'une grande variété de structures, comme des **sphérules** à microcristaux d'orthose non aciculaires, et aussi de microcristallisations **granophyriques**.

Ces dernières peuvent prendre des dimensions et des extensions remarquables, qui les rapprochent en dimension des microstructures miarolitiques dans les granites. Les fibres d'orthose s'épaississent considérablement jusqu'à se terminer en éventails de beaux prismes automorphes, à terminaison régulière, pointés vers les « poches » de quartz (figures 19a et 19b).

C'est l'indication d'un changement de cinétique et de mode de croissance des microlites : dessin de la figure 19c.

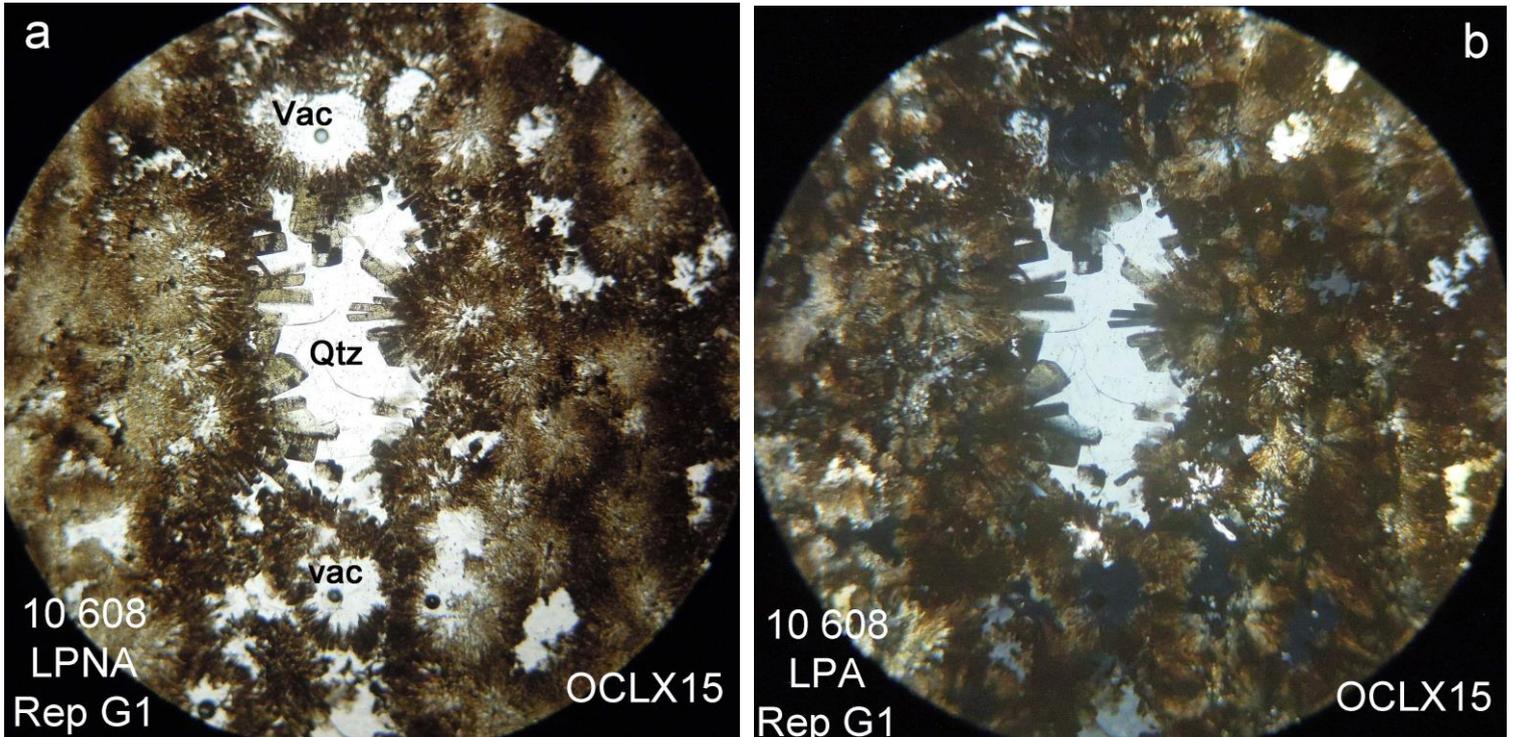
L'apparition de ce nouveau mode de croissance des orthoses est encore mieux illustrée dans les « poches » de quartz de plus grande dimension (figures 20a et 20b).

Des **sphérules**¹² à prismes d'orthose épais et cœur de quartz apparaissent et atteignent une taille millimétrique. Les plus grosses orthoses adoptent un faciès de sceptre, ou de peigne (figures 20c et 20d, et figure 21). L'orthose n'est plus dendritique, mais adopte avec le quartz un autre mode de cristallisation, celui de l'intercroissance à texture **granophyrique**¹³.

Localement, ce mode peut remplacer complètement la texture fibro-radiée (figures 20a et 20b et figure 22). Pour l'établir, on vérifie que les deux composants **micropegmatitiques**, quartz et feldspath, se présentent bien sous forme de grandes plages millimétriques **de même orientation optique**.

Le diamètre des amas sphériques granophyriques ainsi formés atteint le millimètre. Les plus gros prismes d'orthose peuvent être détachés par la contrainte de cisaillement associée avec la fluidalité au moment de la mise en place de la lave. Ils semblent « flotter » dans les grandes plages de quartz interstitiel.

Toutefois, la cristallisation des deux phases quartz et feldspath a été simultanée.



Figures 19a et 19b. À gauche en lumière polarisée non analysée. À droite en lumière analysée : on distingue les interférences en « croix de Malte » sur 19b, caractéristiques des sphérolites en lumière analysée (voir Rossier, 2018 ; voir également le cliché de la figure 21). Au centre des deux clichés, la « poche » de quartz est un monocristal ; elle met en relief les microlites prismatiques d'orthose qui terminent les fibres de la microsphérolite. Le cœur de sphérolite peut être aussi une vacuole. Sur le cliché de gauche, *vac* désigne une petite vacuole, ou vésicule, tapissée de fibres d'orthose. *Lame 10 608, brèche de débouillage.*

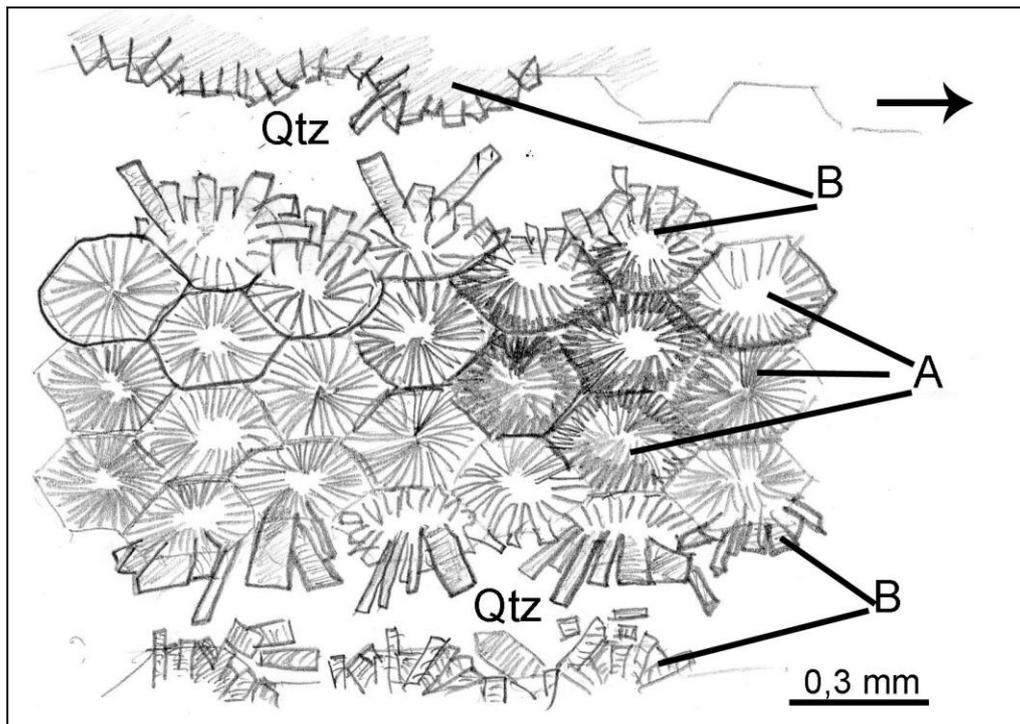
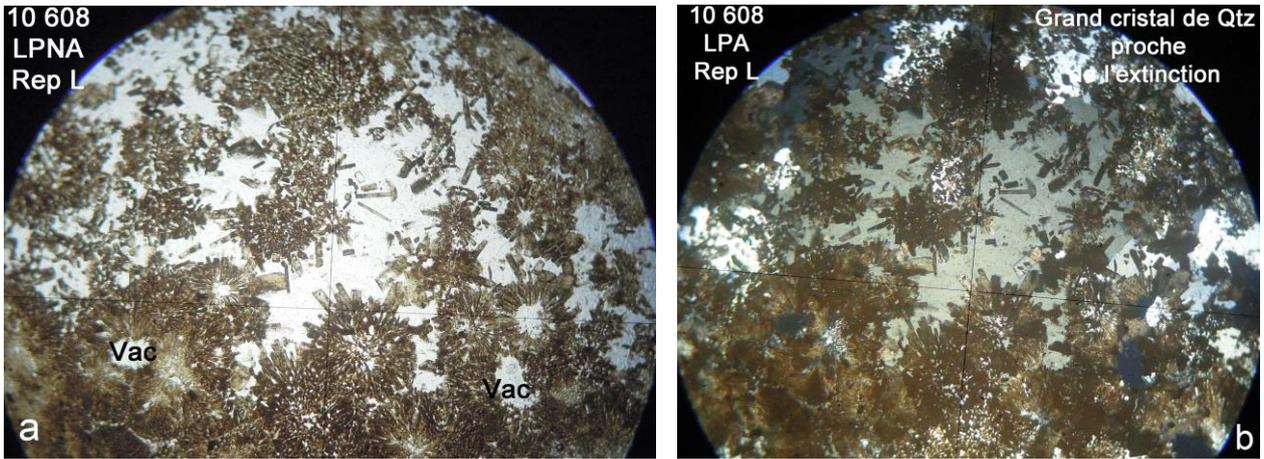


Figure 19c. Dessin de l'empilement compact dans un filet épais de microsphérolites (A) encadré par deux filets de monocristaux de quartz. Les filets sont orientés dans le sens de la fluidalité (flèche). Les orthoses des microsphérolites (B) en bordure ne sont pas des fibres aciculaires, mais de véritables cristaux prismatiques automorphes, bien terminés, dont la cinétique de croissance est complètement distincte de celle des fibres. Dessin D. Rossier.



Figures. 20a et 20b. À gauche en lumière polarisée non analysée. À droite en lumière analysée. Les cristaux d'orthose baignent dans une poche de quartz qui ne forme qu'un seul monocristal de quartz. Échelle : 3 mm à la base.

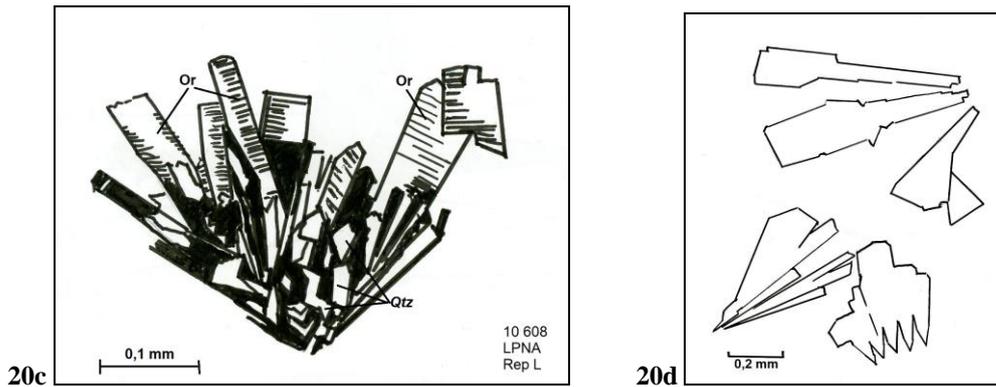


Figure 20c. Buisson d'orthoses en « sceptres ». Au cœur, texture granophyrique avec petits cristaux de quartz en intercroissance avec les prismes d'orthose.

20d. Différents habitus d'orthoses. Sceptres et peignes.

Échelle sur les dessins. Dessins D. Rossier, d'après clichés en LPNA.

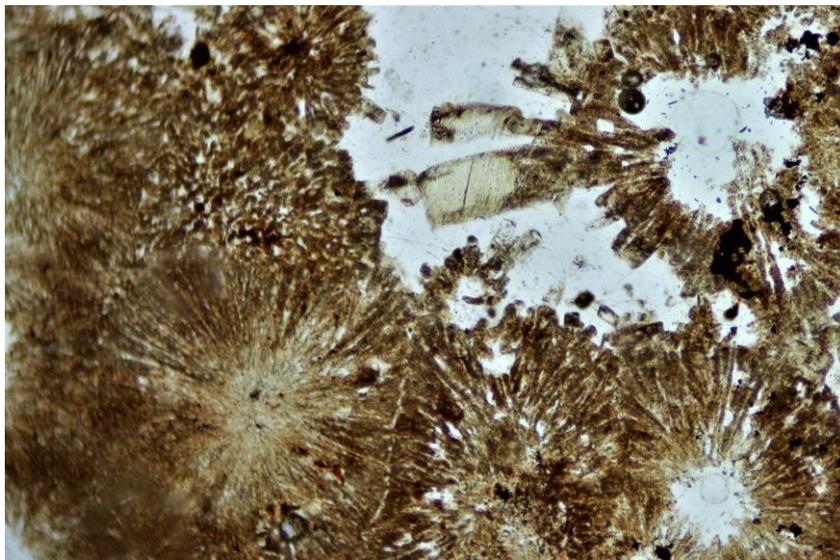


Figure 21. Au centre, deux gros orthoses « sceptre », ayant fait leur croissance libre dans la plage de quartz, à partir d'une sphérolite. En LPA, cette dernière prend la forme caractéristique d'une croix de Malte. Les sphérolites de la moitié droite ont un cœur vésiculaire : la nucléation a été provoquée par la vacuole. Cependant les vacuoles sont peu abondantes et il n'y a aucune corrélation entre la position des vacuoles et le rubanement.

Cliché en LPNA. Échelle 2 mm à la base.

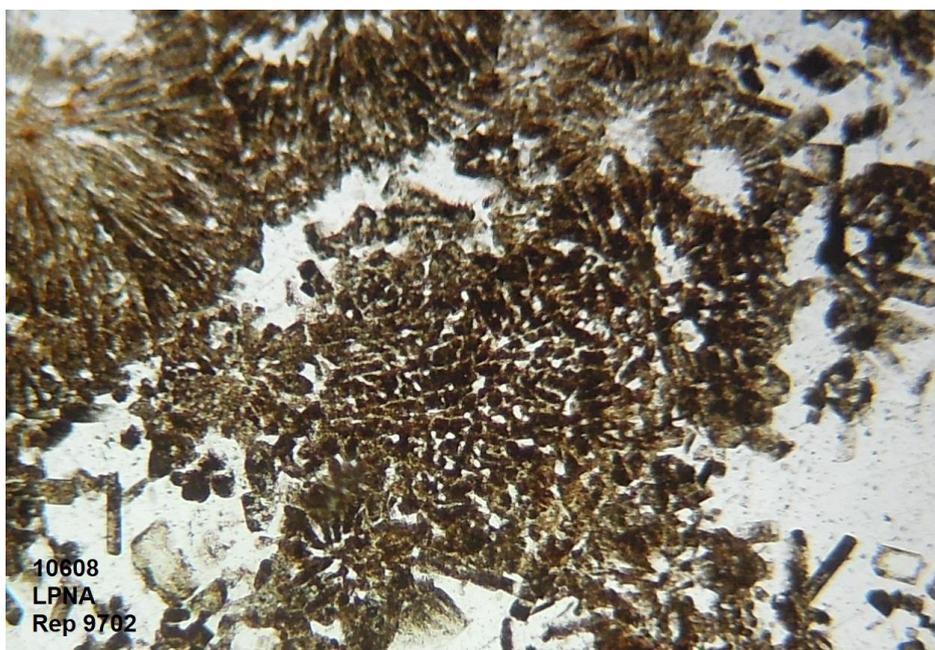


Figure 22. Section d'une sphérule de structure granophyrique. La section ne passe pas par le cœur de la structure radiée (et non fibro-radiée). Les sections des microlites d'orthose et de quartz forment une mosaïque régulière. On vérifie le phénomène d'extinction simultanée en LPA sur toute l'étendue de la sphérule granophyrique. Certaines sphérolites ont également un cœur granophyrique. Échelle : 0,6 mm à la base.

Interprétation et conclusion

Les faits à retenir de ces observations sont les suivants :

- la cristallisation est totale, il n'y a pas de phase vitreuse même résiduelle. Elle se fait avec séparation de phase, locale et périodique dans l'espace, structurée en rubans en lien direct avec la déformation fluidale de la rhyolite. La séparation se fait entre des rubans très majoritaires en volume et à forte densité d'orthose, d'une part, et des plages discontinues (« poches ») de quartz interstitiel dans lesquelles se sont développées des sphérules à gros cristaux d'orthose d'autre part. Le volume mesuré des « poches » de quartz ne dépasse pas 6 ± 2 % du total. Quartz et feldspath sont en intercroissance partout et ont cristallisé simultanément ;
- la cristallisation se fait principalement par un empilement dense, et orienté par la fluidalité, de microsphérolites d'orthose fibreuse. Le quartz y est présent mais le volume relatif qu'il représente dans les sphérolites est impossible à évaluer ;
- au voisinage des poches de quartz interstitiel, la cristallisation des orthoses change de nature et de cinétique. De grands prismes automorphes d'orthose se développent jusqu'à former des sphérules millimétriques à cœur de quartz, et à quartz interstitiel, de texture granophyrique. Certaines sphérules sont granophyriques dans leur totalité.

Les questions auxquelles il faut répondre sont donc les suivantes :

- pourquoi y a-t-il séparation de phase entre le quartz et le feldspath, et donc rubanement ?
- pourquoi la cinétique de croissance du feldspath potassique est-elle si différente entre les sphérolites proprement dites et les sphérules en contact avec les plages/poches de quartz ? Quel est le rôle de la pression partielle résiduelle de vapeur d'eau ?

La première question oriente vers le diagramme de phase du mélange quartz/feldspath potassique (figure 23). Ce diagramme a la forme très classique d'un mélange binaire sans solution solide (immiscibilité), avec composition eutectique¹⁴ : pour celle-ci, le mélange solide fond « comme un seul corps », à la température qui est la plus basse du diagramme, soit 990 °C à basse pression (bien inférieure à 1 kbar). C'est une fusion dite *congruente*, car il ne subsiste aucune phase solide. C'est la « bonne fusion », l'*eutexia* d'Aristote, que nous avons citée dans l'introduction.

À l'inverse, le liquide de même composition, à condition d'être refroidi très lentement, va cristalliser au point de plus basse température du diagramme, en formant un mélange intime de cristaux d'orthose et de quartz.

La composition de l'eutectique a été déterminée expérimentalement par Tuttle et Bowen dès 1958, mais en présence d'une pression partielle d'eau de 2 kbar. Elle est de 41 ± 1 % de quartz et de 59 ± 1 % de

feldspath potassique, en poids, et varie peu avec la pression. La figure 23 représente le diagramme, pour le solidus « sec », c'est-à-dire pour une faible pression, comme celle qui subsistait lors de la formation du bouchon de rhyolite dégazé dans la cheminée, avant le débouillage. La valeur du solidus est de 990 °C. En présence d'une pression notable de vapeur d'eau, la température de solidus chuterait rapidement ; par exemple pour 2 kbar, elle descendrait à 770 °C.

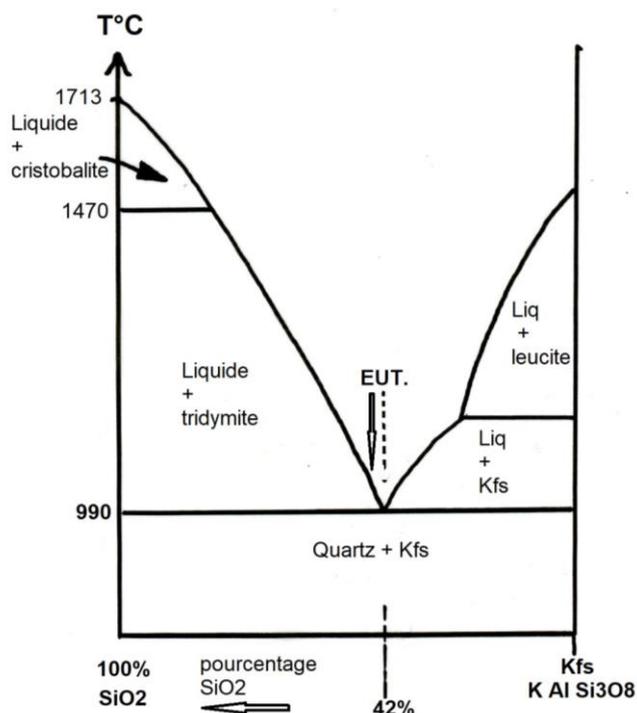


Figure 23. Diagramme de phase du système binaire quartz/orthose. La ligne horizontale à 990°C est le solidus dit « sec ». Il diminue quand la pression augmente (solidus hydraté), tandis que la concentration de l'eutectique est constante. La flèche à gauche de l'eutectique indique la composition du magma avant cristallisation, telle que nous l'avons calculée (voir ci-dessous). D'après Shairer and Bowen (1958), in Roches et minéraux, Lameyre, 1975.

Pour utiliser le diagramme et l'appliquer dans le cas des rhyolites fluidales du mont Vinaigre, il faut évaluer les proportions relatives du feldspath potassique et de la silice. Or on connaît la composition chimique¹⁵ de cette rhyolite; elle est donnée en pourcentage massique des différents oxydes, dans le tableau ci-dessous tiré de la notice de la carte géologique citée en référence (Toutin-Morin *et al.*, 1994).

SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂
76,50	11,60	0,55	1,25	0,10

CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O
0,24	0,05	0,35	8,25	1,00

En première approximation, la rhyolite apparaît essentiellement potassique. Tous les autres cations (Ca, Fe, Ti...) sont très peu abondants, ce qui autorise des simplifications bien utiles dans le calcul, puisqu'il n'y a guère que deux minéraux en présence : on est très proche du système binaire quartz/orthose. En supposant que sodium et potassium soient en totalité inclus dans le feldspath, il suffit alors d'utiliser les poids moléculaires pour calculer le pourcentage relatif du feldspath potassique $K Al Si_3 O_8$ par rapport à la silice libre SiO_2 , c'est-à-dire au quartz, dans la lave en cours de solidification. Il faut simplement retrancher le faible pourcentage de silice entrant dans des silicates et des aluminosilicates avec cations autres que les alcalins (F. Nouyrigat, 2016, communication personnelle). Une dernière correction est à faire pour tenir compte de la contribution des phénocristaux des deux types, inférieure à 1 % en volume.

Les pourcentages relatifs en masse, ainsi calculés pour un mélange binaire fictif qui serait équivalent à la rhyolite, sont les suivants :

45,7 % de quartz et 54,3 % de feldspath.

La marge d'erreur est de ± 1 %.

Les chiffres sont à rapprocher de ceux reportés pour l'eutectique à pression ordinaire de 1 bar (Shairer and Bowen) (figure 23) ci-dessus, respectivement :

40 à 42 % de quartz et 58 à 60 % de feldspath.

Ces calculs montrent un excédent de 4 à 6 % de quartz par rapport à l'eutectique dans le magma. Si le liquide était maintenu pendant longtemps à l'équilibre juste au-dessus de la température de l'eutectique, à plus de 990 °C, il y aurait production de cristaux de quartz en petite quantité dans le liquide¹⁶. Or le refroidissement, y compris pour le bouchon dans la cheminée, est trop rapide pour laisser l'équilibre s'établir. Le magma entre en surfusion sur plusieurs dizaines de degrés et c'est d'ailleurs la condition nécessaire, jointe à la composition sub-eutectique, pour obtenir la structure sphérolitique et granophyrique généralisée dans la roche finale. Dans la lave en forte surfusion, le taux de nucléation (germination) de l'orthose devient très important tandis que la vitesse de croissance a beaucoup diminué par rapport à sa valeur à la température du solidus. Dans ces conditions, seuls des cristaux fibreux ou des structures granophyriques peuvent se développer.

Mais qu'en est-il de la silice en excès par rapport à la composition de l'eutectique ? On a vu, tant par la mesure que par calcul, que cet excès est de 6±2%. La silice en excès serait-elle à l'origine des « poches de quartz » dans les rubans ? En effet, lors de la mise en

place dans les espaces du haut de la cheminée volcanique, celle-ci est obstruée, la pression subsiste ; la température reste élevée pendant longtemps compte tenu de l'inertie thermique du système et des faibles valeurs de la conductivité thermique dans les silicates et aluminosilicates. Elle est ainsi maintenue un peu en dessous de la valeur initiale de l'eutectique, entre 950 °C et 900 °C, tout au long de la formation des sphérolites, à cause de la production de la chaleur latente de cristallisation. D'autre part, il subsiste une pression partielle de fluide non négligeable (H₂O, 1 % en masse).

Les conditions sembleraient réunies pour que le quartz en excès soit mobilisé par la vapeur d'eau résiduelle hors des rubans de sphérolites et qu'il vienne recristalliser. La recristallisation se fait en intercroissance avec des cristaux d'orthose moins denses que dans les rubans de sphérolites. Ces conditions sont favorables à la naissance des structures micropegmatitiques observées.

Notes

1. Les rhyolites fluidales étaient anciennement désignées par le terme de **pyromérides**. Ce terme est à abandonner et n'est pas reconnu au plan international.
2. Repose sur des *prémisses aristotéliennes en mathématiques, musique, optique...* Mais date du V^e ou VI^e siècle.
3. **Felsite**. Composé de feldspath et silice. Adj. felsitique.
4. La **dévitrification** désigne le phénomène de recristallisation partielle subie par certaines roches vitreuses à l'émission, comme les obsidiennes, au cours des temps géologiques.
5. La lettre grecque **ρ** est celle utilisée pour désigner les rhyolites dans la notice et la carte géologique mentionnée, alors que de M. Boucarut utilise la lettre **A** (pour acides), dans les publications.
6. Décrit par Gilbert Crevola (2014).
7. **Nuée ardente**. On rappelle que ce type de volcanisme de *nuée ardente* a été défini par A. Lacroix, à l'occasion de l'éruption meurtrière de la Montagne Pelée, le 8 mai 1902. La nuée ardente (*base surge*, en anglais) est un transport à haute vitesse de fragments solides de toutes tailles en suspension dans un gaz brûlant. La vitesse horizontale peut atteindre quelque 100 km/h.
8. **Tuf volcanique** : roche formée par accumulations de projections volcaniques de toutes tailles, éventuellement soudées à chaud.
9. On entend par là les cristaux de taille millimétrique ou purimillimétrique, préexistants à la mise en place de la coulée, parce que déjà formés au sein du magma.
10. **Mésostase** : fond vitreux ou dévitrifié dans lequel baignent les phénocristaux.

11. Dans la description des clichés de pétrographie, nous utiliserons souvent, par commodité, le terme d'orthose pour désigner le minéral représentatif du feldspath potassique, bien que ce dernier, de nature volcanique, soit de la sanidine. Orthose est un substantif masculin ou féminin dans la littérature.

12. Nous adoptons le terme de sphérolites pour les assemblages non fibro-radiés, mais constitués de pelotes de cristaux bien formés d'orthose.

13. **Granophyre** n. m. [du lat. *granum*, grain, et du suffixe *phyre* emprunté à porphyre] (Syn. felsite) : roche formée de micropegmatites, assemblages de microcristaux de feldspath et de quartz, les cristaux de chaque espèce se présentant avec la même orientation optique. Ce type de structure peut être associé avec des sphérolites. Le terme est appliqué à certains granites mais aussi à des rhyolites dévitrifiées. Adj. granophyrique.

14. Un **eutectique** (du grec εὐτηκτος *-eútēktos-* : qui fond aisément) est un mélange de deux ou plusieurs corps purs, qui fond et se solidifie à température constante de manière uniforme, contrairement aux mélanges habituels où le changement de température conduit à une variation de la proportion de solide par rapport à celle de liquide. Il se comporte en fait comme un corps pur du point de vue de la fusion.

15. Au sens de la norme CIPW, qui présente les résultats sous forme de pourcentages pondéraux d'oxydes, suivant l'ordre décroissant des valences des cations.

16. Il y a déjà les phénocristaux de quartz que nous avons signalés (moins de 1 % en volume), qui ont fait leur croissance dans le magma à plus haute température.

Bibliographie

- Bordet P., 1951. Étude géologique et pétrographique de l'Estérel. Mémoires pour servir à l'explication de la carte géologique de la France, 207 pages.
- Boucarut M., 1971. Étude volcanologique et géologique de l'Estérel. Thèse d'État, Univ. Nice, 2 vol., 487 pages.
- Campredon R. & Boucarut M., 1975. Alpes-Maritimes, Maures, Estérel. Guides géologiques régionaux, Masson et Cie, 174 pages.
- Crévola G., 2010. Le volcanisme rhyolitique du massif de l'Estérel : évolution des connaissances. *Riviera scientifique*, 94, p. 33-52.
- Crévola G., 2014. Étude géologique de la colline de San Peyre et des Rochers des Pendus à l'extrémité nord-orientale du massif de l'Estérel (Mandelieu-La Napoule, Alpes-Maritimes). *Riviera scientifique*, 98, p. 23-38.
- Fisher R.V. & Schmincke H.-U., 1984. *Pyroclastic Rocks*. Springer-Verlag Berlin, XIV + 472 pages.

Lameyre J., 1975. Roches et minéraux. 1 : les minéraux. Doin, 127 pages.

Michel-Lévy A., 1912. L'Estérel. Étude stratigraphique, pétrographique et tectonique. Bull. Serv. Carte géol. Fr., T 21, p. 263-321.

Monteiro M., 1814. Du pyroméride globulaire, ou de la roche connue sous le nom de Porphyre globuleux de Corse. *Journal des Mines*, 209, p. 347-360.

Nouyrigat F., avril 2014. Voyage d'étude dans l'Estérel : originalité de l'Estérel. Tribune libre SAGA.

Nouyrigat F., 2016. Note de calcul sur le rapport sanidine/quartz dans une rhyolite fluidale de l'Estérel. Communication personnelle.

Rossier D., 2018. Les rhyolites de l'Estérel. 1^{re} partie : les rhyolites ignimbritiques. *Saga Information*, n° 366, p. 19-30.

Toutin-Morin N., Crévola G., Giraud J.-D. ... [et al.], 1994. Carte géologique de la France à 1/50 000, 1024, Fréjus-Cannes. Bureau de recherches géologiques et minières, Service géologique national, 2^e éd..

Vallée J., 2014. Excursion dans l'Estérel. Un voyage d'étude de la Commission de volcanisme de la SAGA. *Saga Information*, n° 335, p. 7-13.

Vernon Ron H., 2004. A practical guide to Rock Microstructure. Ed. Cambridge University Press, 594 pages.

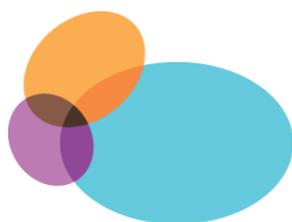
SAGA, 2018. Atlas pétrographique. Lames minces de roches volcaniques. Consultable sur : http://www.saga-geol.asso.fr/Petrographie_frameset.html/

Les photos de l'article sont dues à D. Rossier, sauf indication contraire.

Remerciements

C'est Jean-Marie Cuvelier qui prit l'initiative, en 2013, de nous entraîner à visiter et connaître l'Estérel : nous lui en sommes bien reconnaissants. Vifs remerciements à Yves Grimault, qui m'a accompagné lors du premier voyage de reconnaissance en Estérel, et qui a pris de nombreux clichés. Ma reconnaissance va aussi à l'« équipe Atlas pétrographique » de la SAGA, Danielle Piaud, Roland Maherault et Hélène Quéré, dont la patience et le sens critique ont été déterminants. La contribution de Jacques Vallée pour la mise sur site a été précieuse : qu'il en soit remercié. Un grand merci aussi à Francis Nouyrigat, pour son aide dans les calculs de la composition de l'eutectique. Merci aussi à Gilbert Crevola pour ses conseils bibliographiques.

Merci à Annie Cornée, qui a eu le courage de prendre en charge l'édition de notre revue, avec toute la compétence que nous lui connaissons.



ASSOCIATION
PHILOTECHNIQUE
PARIS

CONFÉRENCE ET COURS DE GÉOLOGIE

Jean-Claude Besombes, géologue, ingénieur ENSG et professeur à l'association Philotechnique, donnera le **samedi 14 mars à 14 h** une conférence intitulée :

« **Informations, mémoires et géologie** ».

Conférence gratuite et ouverte à tous.

Lieu : Association Philotechnique - 18 rue des Fossés-Saint-Jacques - 75005 Paris.

Métro : Maubert-Mutualité, Luxembourg.

Bus : 21, 27, 82, 84, 85, 89.

Durant l'année scolaire d'octobre à mai, Jean-Claude Besombes donne deux cours de géologie :

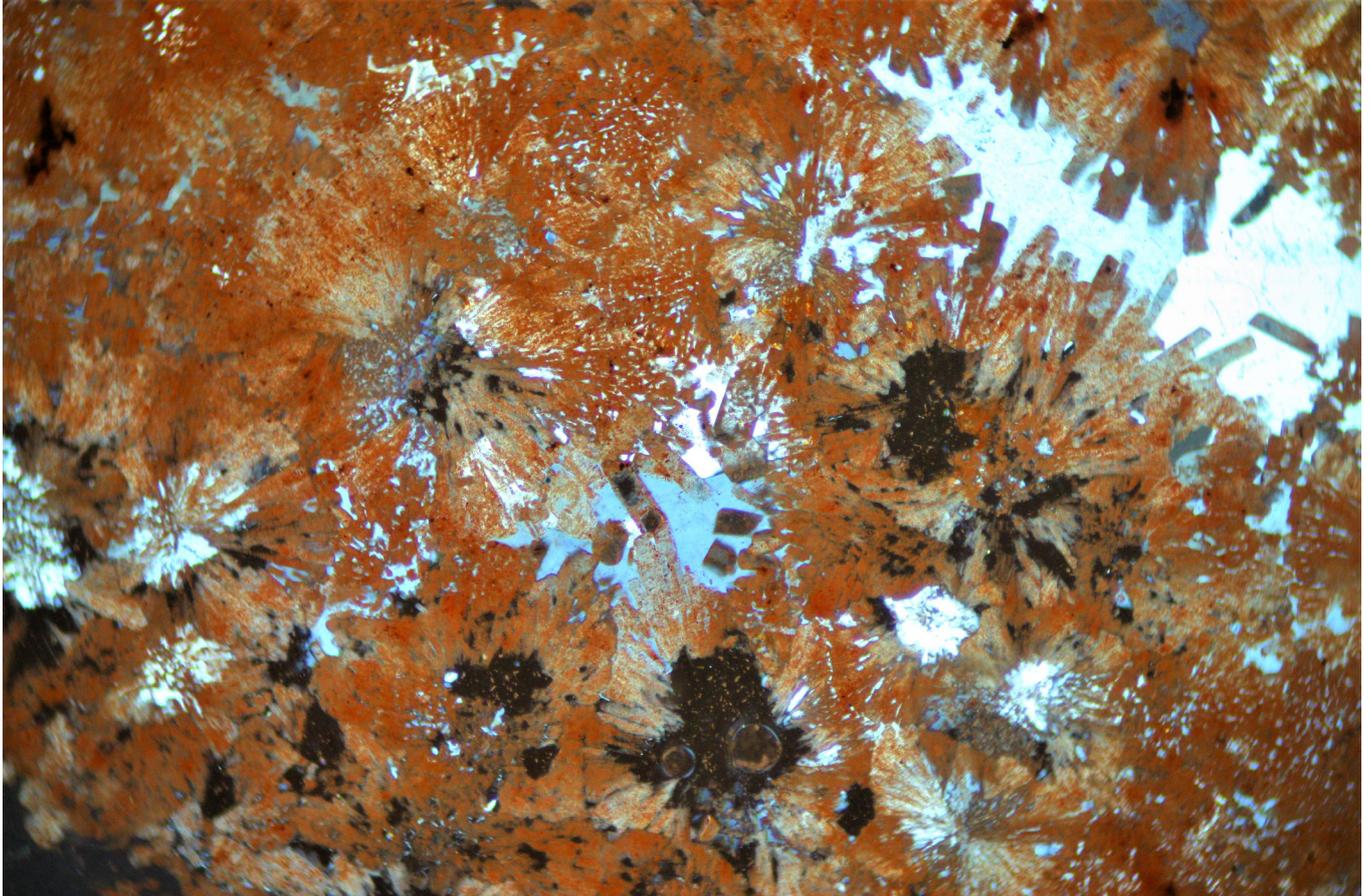
- le premier pour débutant présente les fondamentaux de la géologie (cristallographie, minéralogie, pétrographie, structure de la terre, tectonique, paléontologie, substances utiles à l'homme, etc...) en un survol rapide de tous les domaines pour un public n'ayant aucune connaissance ;

- le second dit d'approfondissement traite des socles, métamorphisme et magmatisme puis, dans une deuxième partie, des mécanismes de formation des concentrations minérales (les gisements) en insistant sur les moyens d'étude ; celui-là s'adresse à un public maîtrisant les bases.

Le programme des cours 2020-2021 sera disponible début juin 2020 sur le site :

<https://www.philotechnique.org/index.asp>

LES RHYOLITES FLUIDALES DE L'ESTÉREL



*Sphérulites quartzo-feldspathiques dans une rhyolite fluidale de l'Estérel.
Au centre et à droite, dans le quart supérieur, les sphérulites deviennent micropegmatitiques,
les cristaux d'orthose s'étant développés dans une poche de quartz
qui ne forme qu'un seul monocristal.
Lumière polarisée analysée. Échelle : 3 mm à la base. Cliché D. Rossier*

Saga PARIS

Société Amicale des Géologues Amateurs

Muséum national d'Histoire naturelle

61 rue Buffon. 75005 Paris

Adresse postale : 43 rue Buffon. CP 48. 75005 Paris