

# LES RHYOLITES DE L'ESTÉREL

## 1<sup>RE</sup> PARTIE : LES RHYOLITES IGNIMBRITIQUES

*Dominique Rossier, animateur de la Commission de volcanisme de la SAGA.*



*Figure 1. Paysage de l'Estérel, au voisinage de la Maison forestière de Malpey, secteur du mont Vinaigre. (Cliché Yves Grimault).*

### Introduction

Octobre 2013 : un groupe d'une vingtaine de membres de la SAGA a visité l'Estérel, pour découvrir ses paysages, sa géologie et son volcanisme fort ancien, daté du Permien. La France est riche en contrées volcaniques, mais l'Estérel sort du lot ; le cachet de ses paysages rougeoyants est singulier, et ne se retrouve qu'en quelques régions comme la Corse. Il est vrai qu'au Permien, la Provence et la Corse étaient unies.

Le voyage de 2013 a fait l'objet d'un article de Jacques Vallée dans le *Saga Information* n° 335 de mars 2014. Aujourd'hui, notre propos est celui de la pétrographie des roches découvertes à cette occasion.

A priori, les rhyolites ignimbrétiques de l'Estérel, répandues en masses énormes au cours d'événements cataclysmiques, ne sont pas spécialement attrayantes du strict point de vue pétrographique.

Comme roches, elles ont belle allure dans le paysage

(figure 1), mais à l'examen visuel, elles présentent un aspect fruste et une apparente monotonie. Nous avons échantillonné sur les sites visités, puis taillé consciencieusement des lames minces, sans trop nous faire d'illusions sur les découvertes potentielles (figure 2). Sans doute le premier examen des lames fut trop rapide et le résultat un peu décevant. Il a fallu attendre 2017, et la nécessité d'intégrer l'Estérel dans l'Atlas pétrographique de la SAGA, pour ressortir la vingtaine de lames des boîtes où elles dormaient sagement, et les faire témoigner. Et elles ont témoigné ! Il suffisait pour cela d'un peu d'obstination et de travail au microscope à fort grossissement. Petit à petit, de nouvelles images sont apparues et, dans la caméra, des formes et des détails inattendus ont été révélés, une esthétique particulière surgit. Nous tenions là enfin de modestes archives des explosions et de la violence des « coulées » d'ignimbrites du Permien.



Figure 2. Le cliché montre l'aspect assez fruste à première vue d'un tuf ignimbritique. Coupe dans le tuf, échantillonné à la Maison forestière de Malpey (mont Vinaigre). Phénocristaux de quartz et de sanidine noyés dans la phase vitreuse, en quantités à peu près égales.

## 2. Dans l'Atlas pétrographique de l'Estérel : rhyolites ignimbritiques, piperno et rhyolites fluidales

Comme tous les chapitres de l'Atlas pétrographique de la SAGA<sup>1</sup>, celui de l'Estérel comporte une introduction géographique et géologique, suivie par la description méthodique de chacune des lames sélectionnées. Le lecteur, ou l'amateur désirent préparer un voyage, trouvera ainsi une description détaillée des lieux d'observation et d'échantillonnage, ainsi que leur signification au regard de l'histoire du volcanisme de l'Estérel. Le travail exposé dans l'Atlas s'appuie abondamment sur la carte géologique et sa notice, éditées par le BRGM (voir la bibliographie), ainsi que sur les publications. L'Atlas couvre l'essentiel des phénomènes volcaniques qui ont façonné l'Estérel, depuis les premières grandes « coulées »<sup>2</sup> de rhyolite ignimbritique du Permien, jusqu'à l'intrusion hypovolcanique du Tertiaire (estérellite). Nous laisserons cette dernière de côté car le présent article, et celui qui suivra, sont entièrement consacrés aux rhyolites, ignimbritiques et fluidales.

Les **rhyolites ignimbritiques** ont un caractère effusif violent et explosif, mais nettement différent des émissions classiques. Les volumes émis et les distances parcourues peuvent être considérables<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> L'Atlas est disponible sur le site de la SAGA et est accessible à tout public.

<sup>2</sup> « Coulée » est pris ici au sens large et par abus de langage en ce qui concerne les ignimbrites.

<sup>3</sup> Plusieurs km<sup>3</sup> sur des distances qui peuvent dépasser la dizaine de kilomètres.

La colonne stratigraphique décrite dans la notice de la carte géologique se déploie sur plus de 700 mètres d'épaisseur !

À l'inverse, les **rhyolites fluidales** sont des coulées au sens classique, mais plutôt discrètes et jamais très étendues. Elles succèdent à des épisodes pliniens, avec brèches de projection, au cours desquels le dégazage de la chambre s'achève. Ces rhyolites fluidales, autrefois appelées pyromérides dans la géologie provençale, constituent le matériau dans lequel sont édifiés les dômes bien conservés comme le mont Vinaigre, si représentatifs du paysage volcanique de l'Estérel. Les pyromérides clôturent la série des émissions. Elles sont l'objet du second article sur les rhyolites de l'Estérel.

Une première raison de s'intéresser à ce type de volcanisme tient au mystère qui a entouré pendant longtemps les ignimbrites et leur mode d'émission. Il y a là une belle page d'histoire de la géologie et des études sur le volcanisme menées au XX<sup>e</sup> siècle. Et nous verrons que tout le mystère n'est pas élucidé.

Une seconde raison de s'intéresser à ce type de volcanisme réside dans l'apport de la pétrographie telle que nous la pratiquons, par microscopie en lumière polarisée. Celle-ci révèle, à une échelle bien inférieure à celle permise à l'œil nu, des détails inattendus mais très révélateurs des phénomènes intimes à l'œuvre au sein d'une « coulée » ignimbritique, à la frontière entre les états gazeux et liquide. La prise de vue doit être prolongée par le dessin qui interprète et simplifie, mais aussi éclaire la signification de bien des détails.

Une troisième raison de notre intérêt, cette fois principalement pour les **rhyolites fluidales**, tient au mode de cristallisation lors du refroidissement rapide de la coulée, sous forte contrainte de cisaillement. Le faciès de cristallisation obtenu, très particulier, est étroitement lié aux conditions physiques et à la composition chimique du magma émis. Là encore le dessin intervient et, cette fois, aussi pour le plaisir esthétique. Cet aspect sera développé dans le second article de cette série consacrée aux rhyolites de l'Estérel.

## 3. Singulières rhyolites ignimbritiques : comment percer leur secret ?

### 3.1. La question des ignimbrites ; historique

*L'historique est en cinq actes.*

• Acte premier. C'est une des grandes énigmes de la paléovolcanologie de la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle. Tout commence le 8 mai 1902, avec l'éruption meurtrière de la Montagne Pelée. Un nouveau concept



apparaît, la nuée ardente, vue comme une suspension de fragments solides de toutes tailles dans un gaz.

- **Acte deux.** Du 6 au 8 juin 1912, survient l'éruption du Novarupta, en Alaska. Toutefois, compte tenu de son éloignement, elle n'est pas directement observée par des témoins ! C'est une éruption fissurale, dont le volume émis est énorme : 13 km<sup>3</sup> ! Elle remplit la « Vallée des 10 000 fumées » par des tufs non classés mais soudés : figures 3a et 3b. Les premières études parlent de « coulée de sable incandescent », ou de « boue incandescente », et elles notent une certaine similarité avec les nuées ardentes... La Vallée des 10 000 fumées devient le prototype des éruptions d'ignimbrite. Le rapprochement se fait alors avec d'autres roches énigmatiques, à structure de **tuf**, mais à morphologie de coulée, décrites dès le XIX<sup>e</sup> siècle aux Canaries, aux environs de Naples, à l'ouest des États-Unis...

- **Acte trois,** 1930. Alfred Lacroix donne un premier modèle, devenu classique, de la nuée à l'origine de ces **tufs**. « Les gaz contenus dans le magma... se seraient dégagés, non pas brusquement, grâce à des explosions violentes, mais d'une façon relativement tranquille (sic!), à la façon... du lait en ébullition s'échappant d'un récipient trop chauffé. Il se serait ainsi morcelé en très menus fragments qui, supportés par les gaz, auraient donné naissance à un torrent de cendres... ».

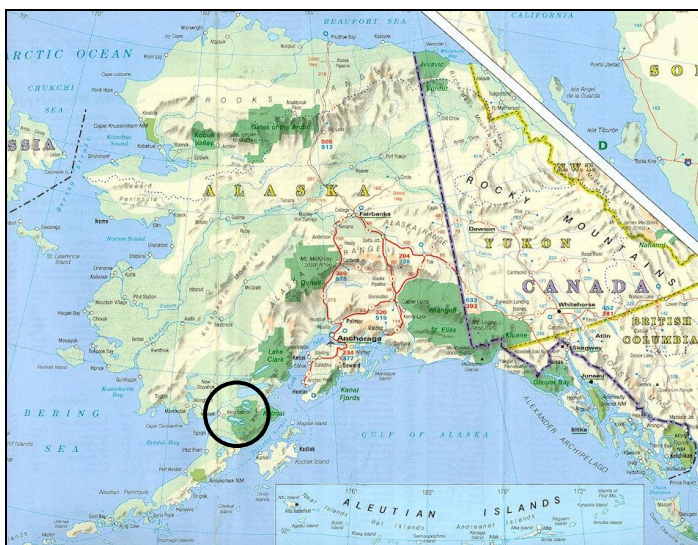
- **Acte quatre,** 1935. Le terme « **ignimbrite** » a été forgé par le géologue néo-zélandais Patrick Marshall. Du latin *ignis*, feu, et *imber*, pluie. À l'origine, le terme se rapportait aux **tufs soudés**. La composition est toujours dacitique à rhyolitique. Toutefois, nous verrons que le terme de « pluie » est bien peu adapté.

- **Acte cinq,** de 1963 à 1966. Pierre Bordet et Haroun Tazieff mettent un peu d'ordre, à partir de leurs études de la Vallée des dix mille fumées ; ils proposent le scénario ci-dessous.

Ils distinguent d'abord une phase pré-ignimbritique, dite de « mousse », de composition liquide et continue, englobant une multitude de petites bulles de gaz. La dilatation excessive des bulles conduit à un changement de phase par pulvérisation. Il y a alors création d'un continuum gazeux, chaud, et la pression s'affaisse brusquement. Ce fluide particulier contient et transporte en suspension de minuscules fragments, soit liquides à forte viscosité, soit déjà en partie solides.

### 3.2. Un étrange état de la matière : liquide, gazeux ou émulsion ?

Au premier abord, l'examen au microscope des lames minces paraît simple. Des phénocristaux<sup>4</sup> de



Figures 3a et 3b. La Vallée des dix mille fumées (The valley of the ten thousand smokes) est une vallée des États-Unis située dans le sud-ouest de l'Alaska, à l'entrée de la péninsule d'Alaska. Localisation sur la carte de l'Alaska.

quartz et de feldspaths alcalins coexistent, souvent en grande quantité. Ils sont en général de taille millimétrique à plurimillimétrique, bien que parfois fragmentés par les chocs à l'émission. Ils sont faciles à identifier et à compter sur une lame. Dans les grosses « coulées » de la première moitié de l'épisode ignimbritique (qui a tout de même duré quelques millions d'années au cours du Permien moyen-supérieur), leur volume peut dépasser 40 % du volume total (figure 4). Leur abondance traduit l'enrichissement en eau de la chambre magmatique. Les coulées sont désignées par la lettre grecque **ρ** (pour rhyolite), précédée d'un chiffre donnant l'ordre chronologique des principaux niveaux stratigraphiques dans la notice de la carte géologique en référence : <sup>5</sup>**ρ**, <sup>7</sup>**ρ**, <sup>10</sup>**ρ** et <sup>11</sup>**ρ** correspondent aux grandes « coulées » où nous avons échantillonné.

convention. En dessous de cette taille, on parle de microlites.

<sup>4</sup> Phénocristaux : cristaux formés dans le magma, avant éruption, de taille supérieure à environ 1 mm par

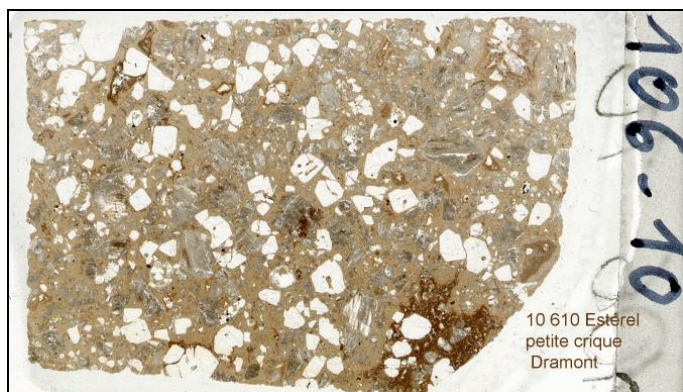


Figure 4. Exemple de rhyolite ignimbritique <sup>5</sup>p. Baie du Dramont. Scan en lumière polarisée. Échelle : 3 cm à la base pour la lame de roche. Les phénocristaux de quartz et de sanidine sont à égalité en volume. Il y a 40 % de phénocristaux au total.

Les phénocristaux massés au sommet de la chambre magmatique sont expulsés par la poussée des gaz. Ils sont entraînés à grande distance par un fluide à haute température. C'est là tout le paradoxe : puisque la densité de phénocristaux est élevée, la viscosité du « supposé fluide » devrait être énorme et il ne devrait pas parcourir de grandes distances. L'explication tient dans la nature particulière du fluide et c'est l'étude pétrographique à l'échelle microscopique qui va éclairer les conditions d'émission et de dépôt. L'examen au microscope de la mésostase<sup>5</sup> pose des problèmes spécifiques de morphologie et d'interprétation en termes de dynamique éruptive.

Les rhyolites ignimbritiques occupent une place particulière dans les roches volcaniques à cause de leur composition et de l'état physique de pulvérisation intime de la matière lors de l'émission et pendant la phase de dépôt. On sait maintenant, à partir des travaux de Bordet sur la Vallée des dix mille fumées (Alaska, du 6 au 8 juin 1912), qu'il ne s'agit pas d'une « coulée » au sens strict (contrairement à ce qui se passe pour les rhyolites fluidales). Le magma d'origine est hypersiliceux et donc excessivement visqueux. La clé de l'explication se trouve dans le rôle majeur des gaz, occlus dans le magma avant la phase éruptive, puis dans leur libération explosive. On peut mieux se représenter la mise en place des ignimbrites sur de très grandes surfaces, comme l'écoulement d'un flux de particules liquides en suspension dans un gaz à très haute température (jusqu'à 950 °C, voire 1 000 °C). Ce flux est celui qui résulte de la « pulvérisation » du magma par les gaz et de son émulsion, les vésicules ainsi créés étant retenus prisonniers du fluide à cause de sa viscosité. Le changement de

phase de l'état liquide pâteux du magma à l'état d'émulsion hyper-fluide s'accompagne d'une brutale augmentation de volume qu'on peut qualifier d'inflation<sup>6</sup>. Dès lors, on peut s'attendre à ce qu'une grande partie du dépôt soit produite par éclatement de ces petites vésicules lors de l'expulsion et de la progression du fluide. Il s'agit donc d'un état original de la matière magmatique, état fluidifié par les gaz, véritable émulsion dont la rhéologie obéit à ses lois propres. Il reste à en trouver des traces – et donc des preuves – par l'examen au microscope de la roche volcanique formée *in fine* à partir de cet état de la matière !

### 3.3. Vésicules éclatées, échardees et texture rhéologique

L'étude fine des roches issues de cet état d'émulsion de magma, mis en suspension puis effondré, écrasé et soudé sur lui-même lors du refroidissement, est développée dans l'Atlas, pour chaque fiche descriptive des lames minces taillées dans ces tufs ignimbritiques. Un des aspects à prendre en compte est l'existence d'une phase microcristalline, au sein de la phase vitreuse. L'étude est morphologique et passe par l'observation au microscope de microcristallisations insolites, squelettiques, certaines très petites, d'autres visibles à l'œil nu. La description morphologique est complétée par la détermination minéralogique des microcristallites, quand elle est possible.

Pour illustrer le travail de recherche et d'interprétation, nous donnons ci-dessous quelques exemples de ces microstructures dont les formes sont extrêmement variables.

Les plus importantes sont les **échardees** (*shards*, en anglais). Ce sont les vestiges des vésicules éclatées, plus ou moins écrasées, puis soudées à chaud et recristallisées (l'observation en LPA<sup>7</sup> le montre). C'est de leur observation au microscope que l'état physique particulier des « coulées » de rhyolites ignimbritiques a pu être déduit. Les échardees peuvent être, soit à contour net, soit fantomatiques, voire même effacées mécaniquement par écrasement sous le poids des dépôts. Elles sont souvent difficiles à observer, et revêtent des formes extrêmement variables suivant la densité et la morphologie initiale des vésicules, en bulles ou en tuyaux (figures 5a et 5b). La texture qui en résulte est dite texture vitroclastique de bulles, car

<sup>5</sup> Mésostase : matière interstitielle vitreuse ou finement cristallisée, remplissant les espaces entre les microlites et les phénocristaux (voir la note n° 4 ci-dessus).

<sup>6</sup> Inflation : nous empruntons ce terme aux astrophysiciens, qui l'ont adopté pour expliquer l'accroissement vertigineux de l'Univers quelques fractions de secondes après le big bang.

<sup>7</sup> LPA : lumière polarisée analysée. En LPA, les échardees apparaissent éclairées sur le fond vitreux sombre parce qu'elles sont microcristallisées. La composition est quartzo-feldspathique.



elle se forme par éclatement d'un magma émis, dont la vésiculation s'est effectuée sous forme de bulles. Les formes des écharde évoquent très approximativement les lettres X et Y.

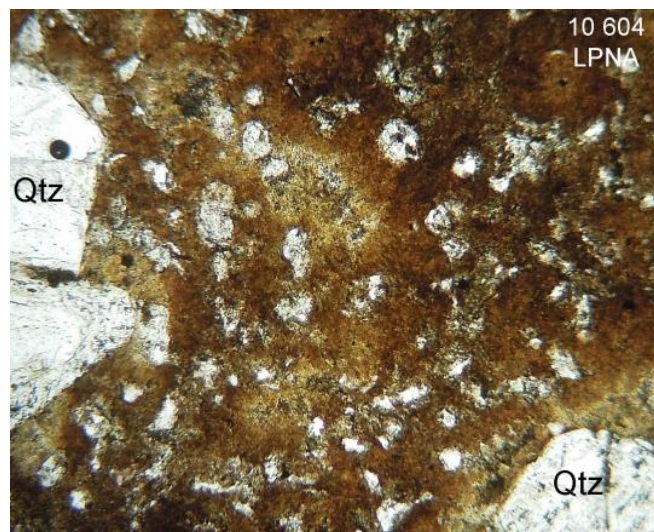


Figure 5a. Écharde recrystallisées dans la rhyolite ignimbritique <sup>5p</sup> de la baie du Dramont. Lame mince n° 10 604. Échelle : 1,3 mm à la base.

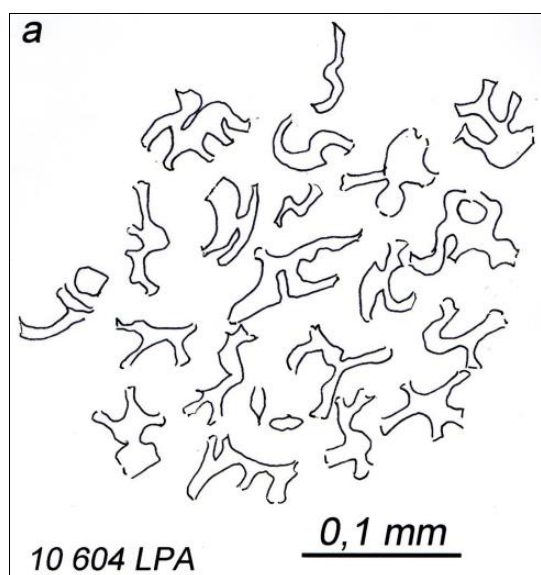


Figure 5b. Dessin d'écharde en X, Y ou de formes complexes, dans la même lame mince.

Dans la plupart des lames que nous avons observées (voir l'Atlas pétrographique de la SAGA), les délicates formes courbes des écharde que nous avons dessinées (figures 5) ont disparu et sont remplacées par des formes linéaires de plus petite taille, organisées en faisceaux denses, courbés au voisinage des phénocristaux. Il s'agit d'une texture rhéologique, c'est-à-dire d'écoulement de la matière encore plastique et déformable, s'enroulant autour des phénocristaux de quartz et de feldspath (figures 6a et 6b).

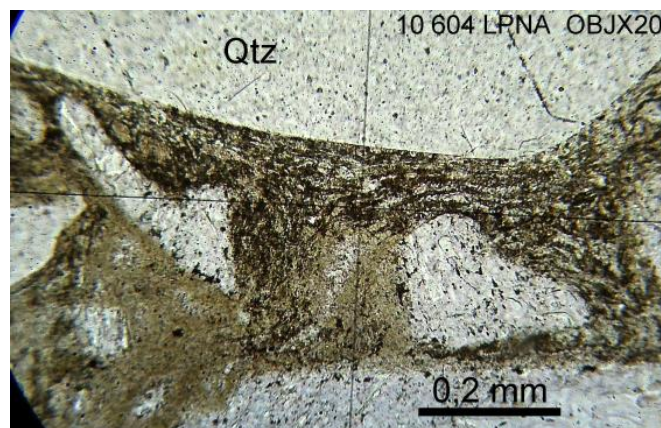


Figure 6a. Texture rhéologique. Les écharde sont écrasées par l'écoulement et recrystallisées (microcristallisations « squelettiques ») dans la rhyolite ignimbritique <sup>5p</sup> de la petite crique du Dramont. Lame mince n° 10 604. Échelle sur la photo. Lumière polarisée non analysée.

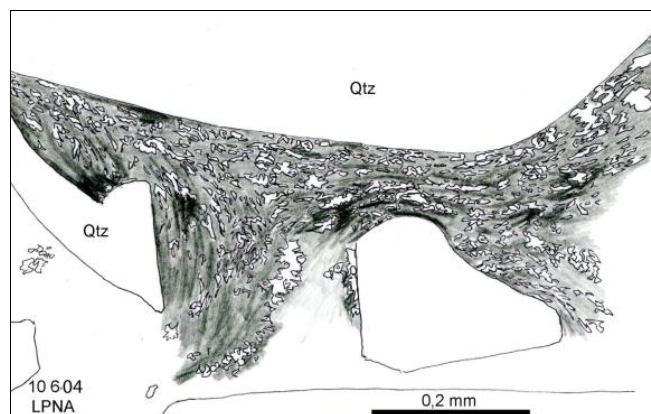


Figure 6b. Dessin d'interprétation du cliché 6a ci-dessus.

Les écharde peuvent atteindre 0,2 mm. Leur dimension moyenne est comprise entre 0,05 et 0,1 mm. Mais l'épaisseur du film liquide enfermant les vésicules est bien inférieure, de l'ordre d'une vingtaine de micromètres.

### 3.4. Un modèle macroscopique du fluide ignimbritique et de ses transformations.

Il n'est pas envisageable d'interpréter individuellement chaque forme d'écharde, mais il est possible de comprendre leur origine en construisant un modèle macroscopique. Les schémas des figures 7a à 7d offrent le cadre général de compréhension des phénomènes qui se déroulent en trois étapes. Elles représentent des vues à deux dimensions de la matière, donc des coupes dans le fluide magmatique de la « coulée » ignimbritique ».

Le changement de phase est quasi instantané et, compte tenu de l'inertie thermique du magma pulvérisé, la température au cœur de l'écoulement reste voisine de 1 000 °C. La masse, et surtout le volume



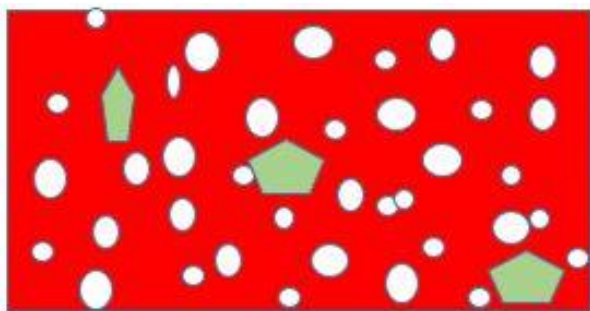


Figure 7a. Apparition des premières vésicules de gaz par détente dans la chambre magmatique. On a également figuré les phénocristaux de quartz et de feldspath, qui préexistent dans le magma.

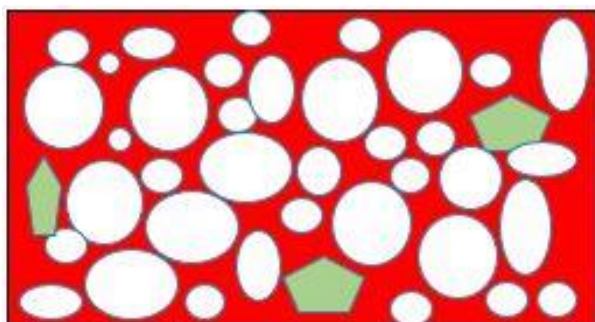
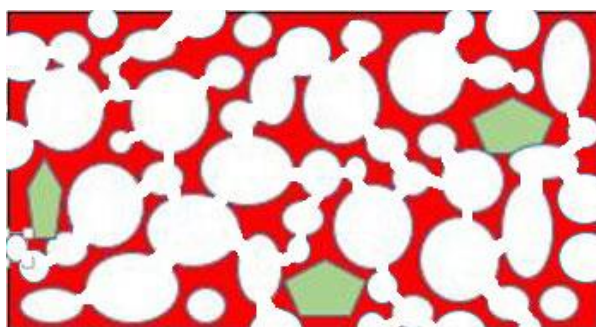
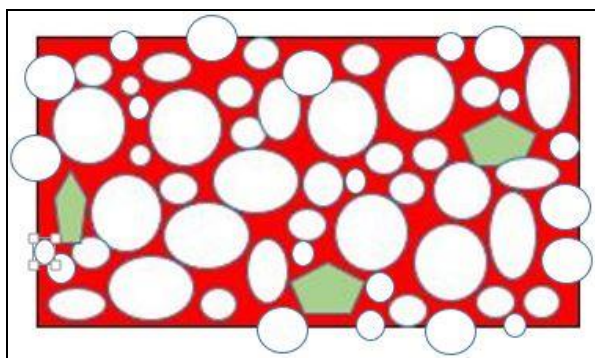


Figure 7b. C'est l'« inflation », par expansion brutale du volume des bulles ; mais le milieu est encore un continuum liquide.



Figures 7c et 7d.

Étapes de création de l'émulsion et de son transport. Ces étapes sont décisives car elles sont marquées par un changement de phase. D'un continuum liquide, le milieu passe à un continuum gazeux où le liquide devient une émulsion, une « mousse ».

de matière à l'état de mousse, créée par l'explosion et le phénomène d'inflation, sont énormes, si bien que pendant toute la durée de l'éruption, cette nouvelle matière est énergiquement repoussée vers l'extérieur et transportée à grande vitesse sur plusieurs centaines de mètres, voire de kilomètres. Le transport est accompagné d'une chute brutale de la pression, de l'écrasement, du refroidissement et de la soudure des particules de matière.

Observons les schémas des figures 7c et 7d. Si le schéma 7c était à trois dimensions, on verrait encore des vésicules accolées entre elles par une mince pellicule liquide. Le lecteur peut facilement les visualiser en se procurant, dans un bazar, ces curieuses balles plastiques gélatineuses, astucieusement contenues dans une résille (*mesh*), boules dont la manipulation est censée apaiser le stress, dénommées « *mesh squish ball* » (figure 8). Une légère pression de la main fait jaillir une quasi-émulsion, comme celle de nos ignimbrites... mais sans l'effet d'« inflation » !

Dans le schéma 7d, les vésicules ont éclaté et il ne subsiste plus que leurs vestiges. Ce sont ces derniers que nous observons après refroidissement, sous la forme d'échardes. Le lecteur intéressé pourra créer lui-même des modèles d'échardes, comme l'a fait l'auteur de cet article, en sculptant en pâte à modeler trois ou quatre fines coques de vésicules, accolées l'une contre l'autre, puis en découpant le modèle au rasoir, en plusieurs « lamelles » (fig. 9). Puis comparer aux échardes observées ou dessinées (figures 5).



Figure 8. « Mesh squish ball ».

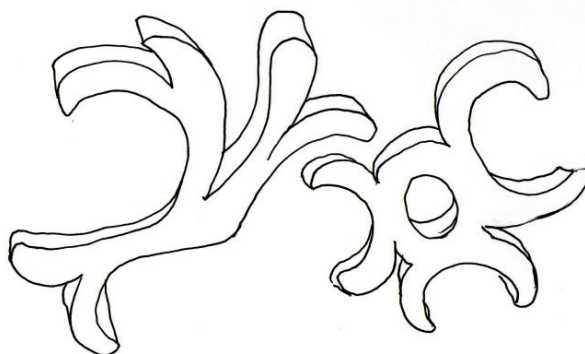


Figure 9. Dessin des « lamelles » obtenues en découpant au rasoir un modèle de quatre coques de vésicules accolées.

### 3.5. Surfusion et début de cristallisation : dendrites

Dans les tufs relativement homogènes, observés à une large échelle sur la côte (petite crique du Dramont), et aux abords du mont Vinaigre, la cristallisation du fluide magmatique déposé, décrit ci-dessus, est très limitée : elle apparaît sous la forme de sphérolites dans les flammes des pipernos (chapitre 4), et aussi au voisinage des enclaves de ponce<sup>8</sup> ou de roche encaissante, emballées dans l'éruption. La cristallisation concerne également, comme nous venons de le voir, les échardes, celles-ci étant noyées dans un verre quartzo-feldspathique qui apparaît comme tel en LPA : un fond continu sombre. Le cas des pipernos, dans lesquels apparaît une cristallisation sphérolitique plus ou moins en masse, est traité dans le chapitre 4.

Lors de son transport, et au moment du dépôt, le fluide magmatique est dans un état physique complè-

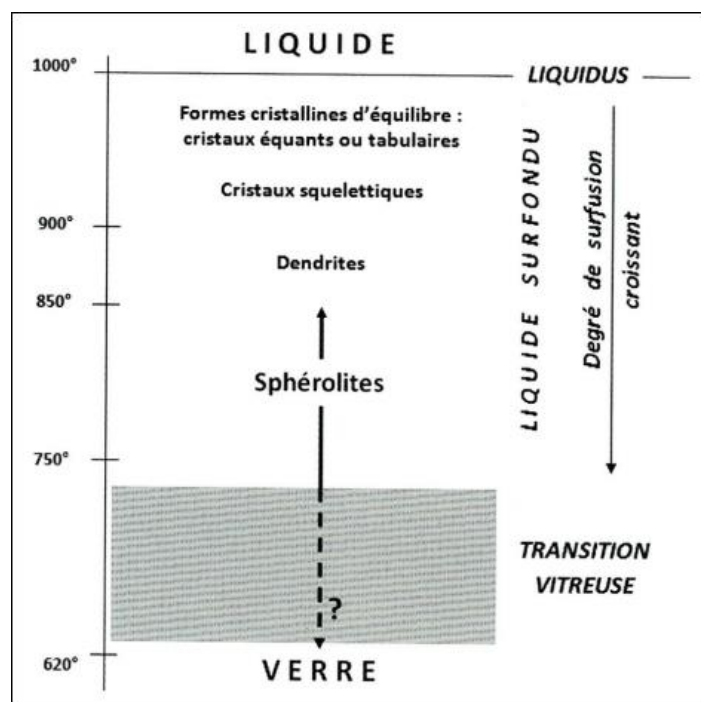


Figure 10. Diagramme des états successifs du fluide ignimbritique en état de surfusion et transition liquide/verre. Le diagramme est tiré de l'article de G. Crevolat, cité dans la bibliographie.

<sup>8</sup> Ponce : « roche magmatique vitreuse, très poreuse » (voir définition dans le dictionnaire de géologie, en référence dans la bibliographie). Son mode de formation est évidemment proche de celui de la rhyolite ignimbritique. Mais, au lieu d'un écoulement continu, la ponce résulte de la projection de fragments du magma contenant encore toute la charge des gaz ; ceux-ci voient leur pression chuter brusquement, avec formation de bulles séparées par de minces parois de magma pâteux. Ce dernier se refroidit et se solidifie rapidement sur la trajectoire balistique, donnant un solide poreux.

tement hors d'équilibre, avec un degré très élevé de surfusion du magma. La cinétique de refroidissement est suffisamment rapide pour tremper la masse du fluide surfondu et la transformer en verre (figure 10).

Le diagramme fait apparaître des exceptions : la possibilité de nucléation et de croissance des microcristaux squelettiques d'échardes, mais aussi, et à plus basse température, l'apparition de **dendrites**. Ces dernières ne sont pas toujours présentes, car soumises à des conditions particulières de vitesse de refroidissement. Elles sont dispersées, et se détachent en fort contraste sur le fond vitreux, en LPNA<sup>9</sup>, comme nous l'avons observé sur les tufs de la Maison forestière de Malpey, au voisinage du mont Vinaigre (figure 11). Ce sont de très fines cristallites et microlites de forme caractéristique. Elles ont été décrites dans des articles sur les verres volcaniques felsiques dont une synthèse est présentée dans l'ouvrage de référence *A practical guide to Rock microstructures*, par Ron H. Vernon, (page 79). Leur dénomination en anglais est : *Spiky and fern-like crystallite-or microlite*, le mot *fern* désignant la fougère.

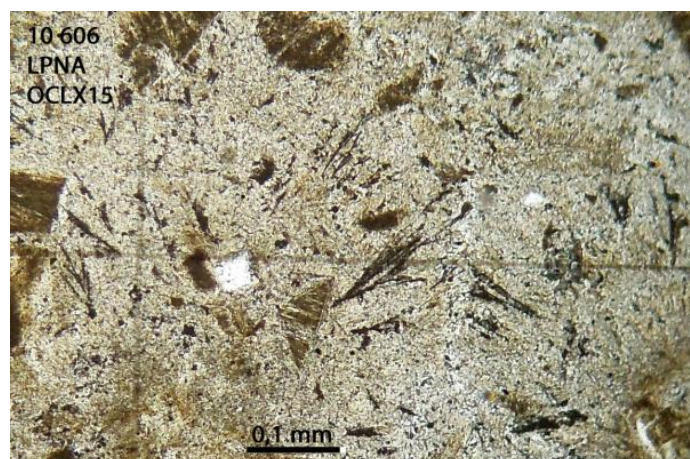


Figure 11. Microlites dendritiques de type c (aigrettes), observées sur les tufs de la Maison forestière de Malpey. La grande aigrette dendritique au centre du cliché dépasse 0,1 mm.

Dans le cas présent, nous distinguons les microlites dendritiques en forme d'« aigrettes » (type c) et celles en forme de « fougères » (type b), ainsi qu'illustrées sur les dessins des figures 12a et 12b. Les branches des « aigrettes » sont courbées avec un rayon de courbure supérieur à 0,3 mm.

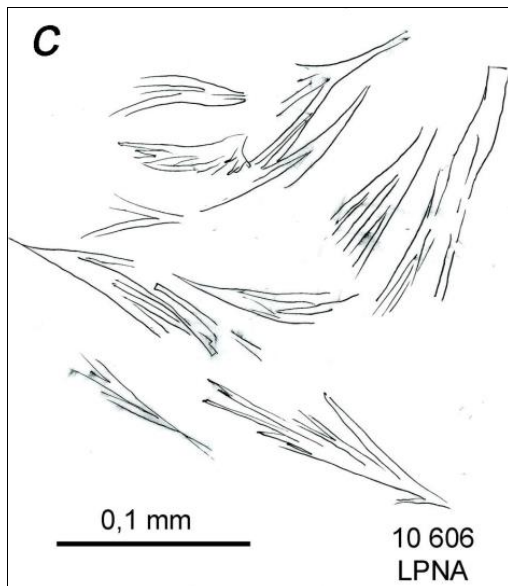
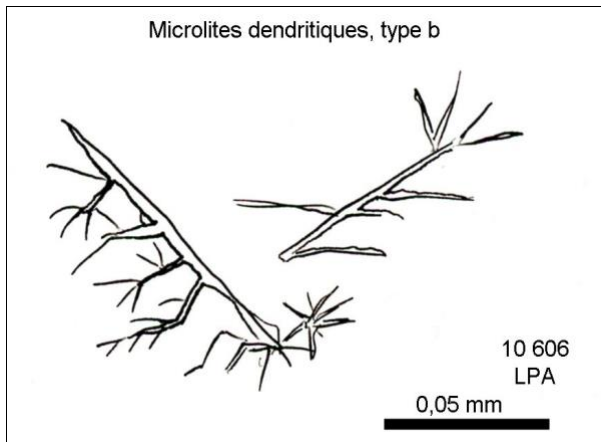
Ces cristallisations sont de nature dendritique<sup>10</sup>, et les ramifications sont visibles sur le type « fougères ». L'interprétation de Vernon est en faveur de cristaux de feldspath alcalin dont la croissance rapide s'est

<sup>9</sup> LPNA : lumière polarisée non analysée.

<sup>10</sup> Pour mémoire : une dendrite est une figure finement arborescente, constituée par des files ramifiées de petits cristaux indiscernables à l'œil. Structures à géométrie fractale.



faite dans la pâte vitreuse refroidie dans des conditions hors d'équilibre de sursaturation ou de très forte surfusion, c'est-à-dire à une température largement inférieure à la température du solidus du système binaire quartz-orthose.



Figures 12a et 12b. Dessins de microlites dendritiques de feldspath alcalin, à partir des observations sur les tufs de la Maison forestière de Malpey.

#### 4. D'autres états de la matière.

##### Flammes dans les pipernos.

##### Modes de cristallisation du magma éjecté, microclastes et sphérolites.

**Piperno** est un terme italien qui désigne une roche magmatique, présente principalement dans la région volcanique des champs Phlégréens, à Naples, en Campanie. Le piperno était extrait des carrières de Quarto ainsi que dans certains quartiers de Naples. Ce tuf jaune napolitain présente une texture particulière, caractérisée par des concentrations lenticulaires de couleur grise dites **fiamme** (« flammes », en français), englobées dans une matrice de la même

couleur mais plus claire. Elles sont toutes orientées dans la même direction. Les **fiamme** sont des projections de petits paquets de magma dégazé, aplaties en forme de flammes, certaines éclatées, d'autres en grande partie vitreuses, à cœur de ponce partiellement recristallisée (définition du dictionnaire de géologie, en référence).

Dans l'Estérel, les pipernos sont localisés dans un périmètre étroit de quelques kilomètres au voisinage du centre d'émission du mont Vinaigre, et correspondent au niveau stratigraphique <sup>10</sup>p des émissions qui précèdent juste la phase terminale des coulées de rhyolites fluidales notées <sup>11</sup>p (dites **pyromérides**, et que nous décrirons dans le second article). Les flammes sont créées par l'écrasement, parfois l'éclatement, des paquets de rhyolite ignimbritique éjectés en même temps que la coulée proprement dite. Pour Boucarut (1971), elles se forment par dislocation de portions plus visqueuses de magma lorsque le refroidissement de celui-ci est assez avancé. Elles sont faciles à observer à cause de leur abondance. Elles représentent plus de la moitié du volume, ce qui permet d'identifier ces tufs à des clastolaves<sup>11</sup>. Leurs dimensions sont centimétriques, et elles sont visibles à l'œil nu sur les affleurements. Leur disposition allongée indique une fluidalité, liée à la direction de l'écoulement (figures 13a et 13b).

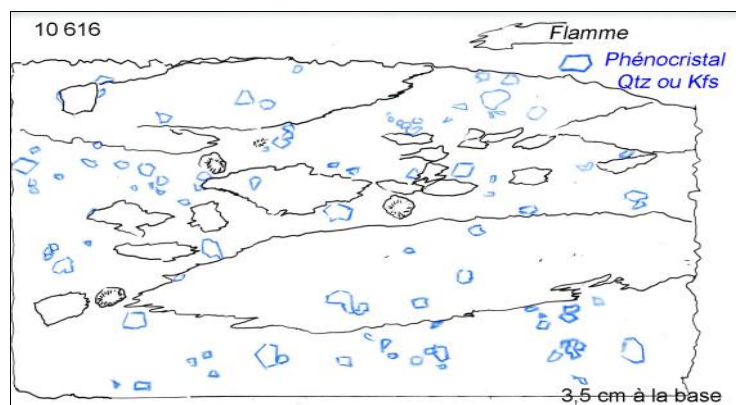
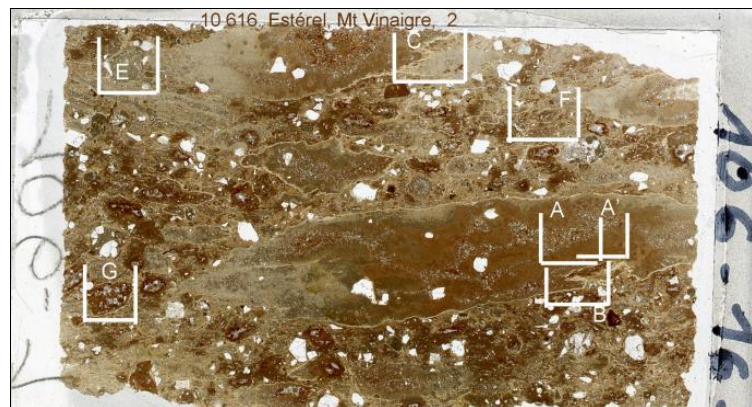


Figure 13a. Affleurement de piperno sur la piste d'accès au mont Vinaigre. (Cliché Yves Grimaul).

<sup>11</sup> Clastolave. Le terme *claste* désigne un fragment en général.



L'examen pétrographique des flammes présente l'intérêt de mettre en lumière de nouveaux modes de cristallisation du magma éjecté, alors que nous n'avons décrit jusqu'à maintenant que les échardes et les dendrites de feldspath, cristallisées et noyées dans une phase vitreuse majoritaire.



Figures 13b. Scan d'une lame mince taillée dans le piperno de la figure 13a, et dessin d'interprétation, avec l'échelle.

Les traits blancs avec lettre délimitent les zones où ont été pris des clichés.

Examinons la structure d'une grande flamme telle qu'elle apparaît sur la photo de la figure 13b.

Les flammes brunes à rouge-brun s'étalent sur une matrice plus claire. Les contours des flammes sont tous marqués par un fin liseré blanc, qui représente la trace de la soudure entre la flamme et sa matrice vitro-clastique (voir le sens de *claste* dans la note 11). C'est ce qui permet de les identifier.

Les flammes occupent à peu près la moitié du volume total. Les dimensions des flammes sont centimétriques à pluricentimétriques. Certaines sont fragmentées en plus petits éléments millimétriques (voir dessin de la figure 13b). L'intérieur des flammes paraît uniforme en première analyse. Cependant, l'examen au microscope permet de bien distinguer de grands volumes amorphes (vitreux) uniformes, plutôt dans la périphérie de la flamme, et de petites zones de cœur finement microcristallisées. Ainsi, il apparaît que les flammes sont issues d'un magma déjà largement dégazé, peut-

être un peu moins chaud, en fin d'émission des ignimbrites.

Ce sont les zones de cœur de flammes microcristallisées qui nous intéressent. L'examen au microscope permet une analyse morphologique et minéralogique encore plus fine (figures 14 et 15, clichés ainsi que dessin d'interprétation). La structure est celle d'un mélange dense de microclastes de quartz et de microsphérolites d'orthose. Il y a donc eu cristallisation avec séparation de phase des deux minéraux. Nous les décrivons maintenant, séparément.

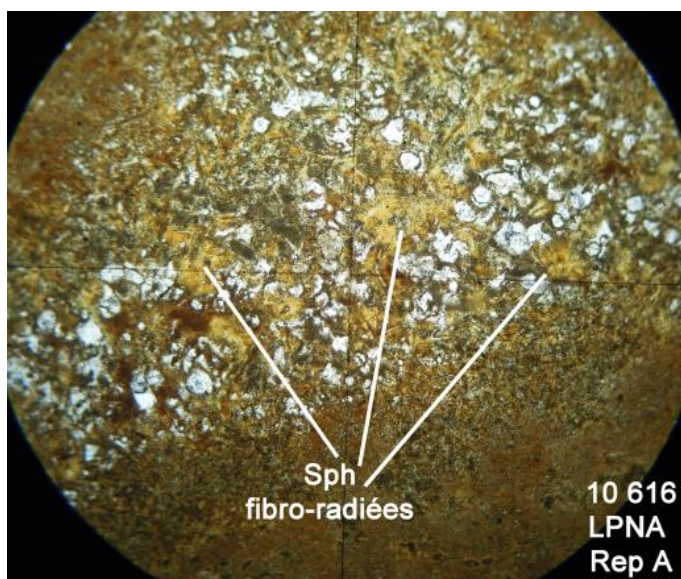


Figure 14a. Cliché en LPNA, pris dans un cœur de flamme du piperno <sup>10p</sup> du mont Vinaigre. Échelle de 2,8 mm à la base. Microclastes de quartz sur fond de microsphérolites. C'est le cliché en LPA (non représenté) qui permet d'établir qu'il s'agit de quartz à l'état cristallin.

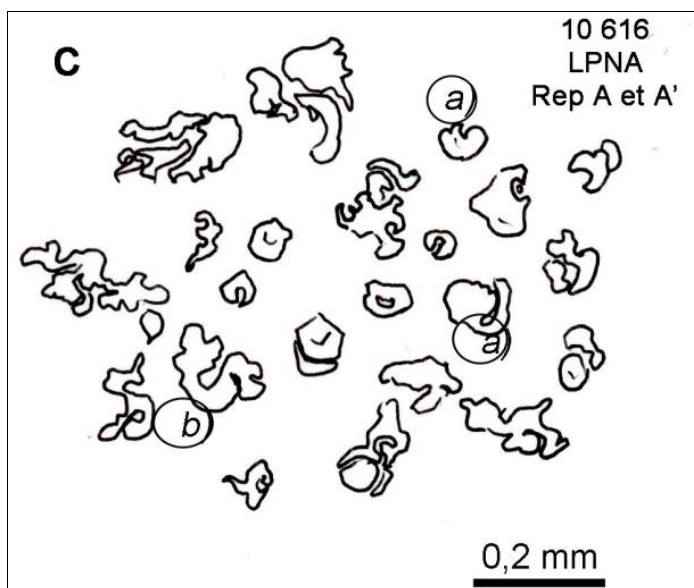


Figure 14b. Dessin d'interprétation illustrant la variété des morphologies des microclastes de quartz, avec en particulier celles en pelure d'oignon et celles en ombilic.



#### 4.1. Microclastes de quartz

Sur le dessin de la figure 14b, illustrant la morphologie des microclastes de la phase quartz, apparaît deux formes principales :

- a) formes sphériques, ou en pelure d'oignon, avec une couche concentrique. Leur diamètre ne dépasse pas 0,1 mm ;
- b) formes d'ombilics.

Ces formes sont distinctes de celles, examinées plus haut, des échardes plus ou moins allongées résultant de l'éclatement et de l'écrasement d'une mousse rhyolitique vésiculaire. Dans le cas présent des flammes du piperno, le magma rhyolitique dégazé a une composition voisine de l'eutectique quartz-orthose, comme nous le montrerons dans le second article. L'orthose précipite en premier sous la forme de **microsphérolites** (voir § 4.2). Puis le quartz cristal-

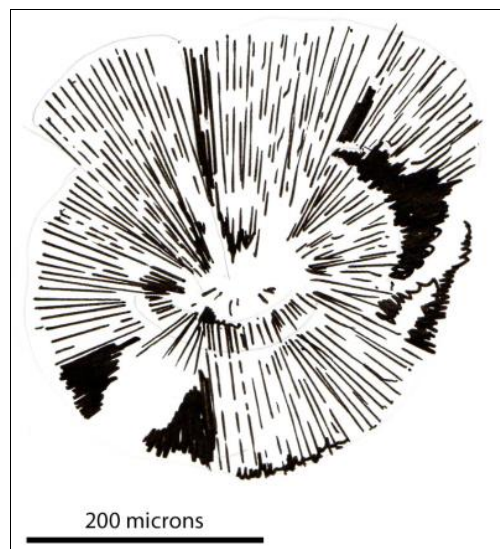


Figure 15c. Dessin d'interprétation d'une microsphérolite.

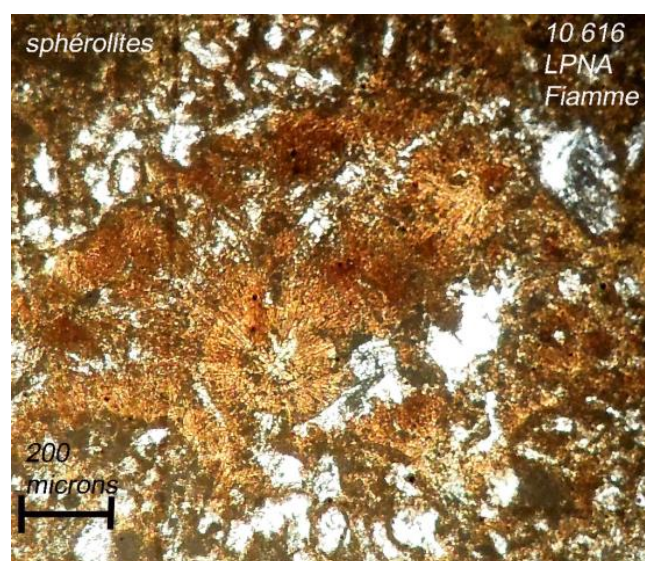
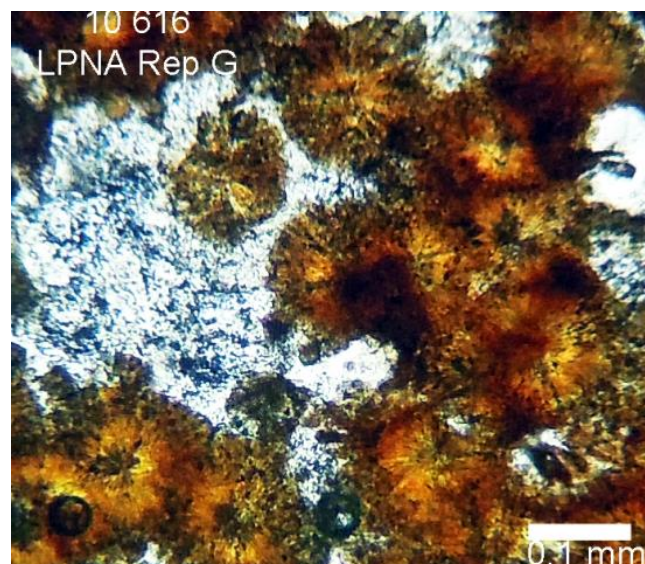


Figure 15a et 15b. Clichés en LPNA de microsphérolites d'orthose. L'échelle est indiquée sur les clichés.

lise à son tour à partir des petites gouttes du liquide résiduel enrichi en silice. Cette cristallisation est fragmentée parce que le refroidissement de la flamme est trop rapide pour produire de grandes plages de quartz comme dans les pyromérides (développé dans le second article) ; la texture est dite felsitique.

D'après le dictionnaire de géologie (en référence dans la notice bibliographique), les sphérolites sont des petites masses sphériques de diamètre variable, au plus de quelques millimètres, de structure fibro-radiale : elles sont constituées d'un très grand nombre de microcristaux allongés (souvent aciculaires) rayonnant depuis le centre. Dans les roches volcaniques cristallisées ou dévitrifiées, elles sont felsitiques, c'est-à-dire composées de feldspath potassique (orthose) sur quartz interstitiel, et parfois de quartz.

Dans le cas des flammes du piperno du mont Vinagre, le diamètre est bien inférieur au millimètre, et varie de 0,1 à 0,2 mm : ce sont des microsphérolites. Le second cliché (figure 15a) et le dessin d'interprétation de la figure 15b montrent bien la structure radiale, composée en volume de milliers de longues fibres d'orthose (une centaine dans la coupe de la lame mince) ! Chaque cristal aciculaire, d'une centaine de micromètres de long, a son épaisseur qui ne dépasse pas 10 micromètres. L'examen en LPA, et le fait qu'ils soient colorés en brun-rouge en LPNA, montrent que ces cristaux aciculaires sont de l'orthose, probablement associée à du quartz interstitiel. De nombreuses microsphérolites présentent, au moins partiellement, une structure concentrique superposée (dessin de la figure 15b).

Les sphérolites de quartz sont aussi présentes, plus difficiles à observer à cause de leur taille encore plus réduite que celle des microsphérolites d'orthose (figures 16a et 16b). On les reconnaît et on les



distingue bien des orthoses, en mode d'observation LPA, par la couleur de la « croix de Malte »<sup>12</sup>.

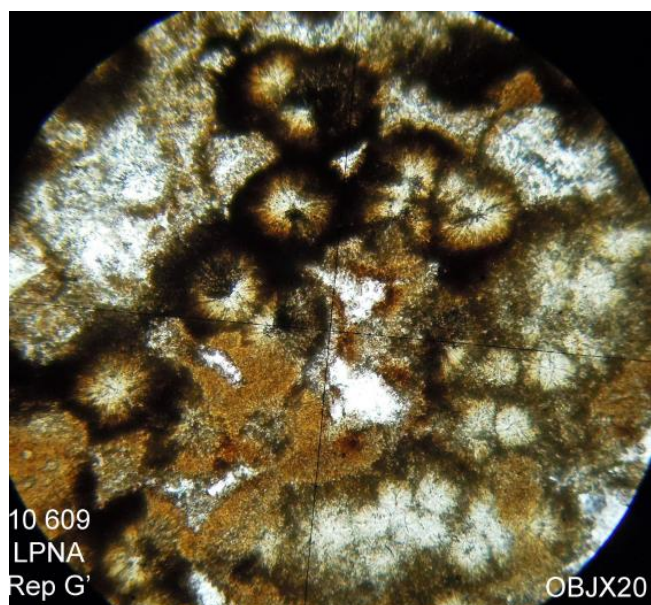


Figure 16a. Cliché en LPNA de microsphérolites d'orthose à contours sombres, et de microsphérolites de quartz dans le quart inférieur droit. L'échelle est de 0,8 mm à la base.

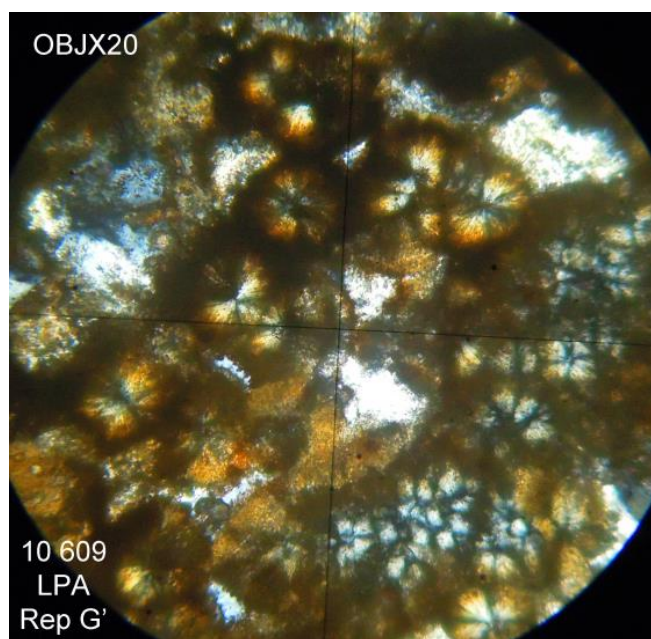


Figure 16b. Cliché en LPA du même emplacement, et même échelle que 16a. Noter les formes caractéristiques en « croix de Malte » colorées et à contour sombre des microsphérolites d'orthose, et au contraire bien claires pour les microsphérolites de quartz.

Les liserés clairs, qui délimitent les flammes soudées au tuf, sont aussi un bel exemple de cristallisation en

<sup>12</sup> Pour l'explication de la forme en « croix de Malte » des microsphérolites observées en LPA, consulter l'Atlas pétrographique, lame n° 10 616, page 5.

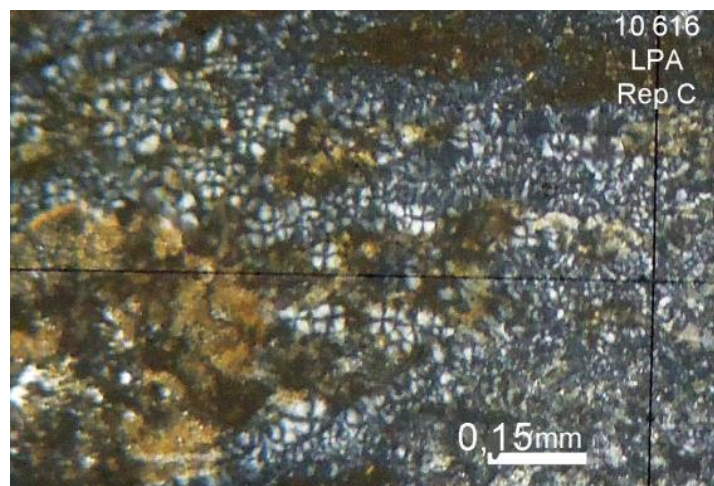


Figure 17. Cliché en LPA des microsphérolites de quartz à la soudure des flammes dans la matrice vitroclastique des tufs de piperno. Le faciès en « croix de Malte » est bien visible. Échelle sur le cliché.

microsphérolites riches en quartz, comme le montre le cliché de la figure 17.

Dans beaucoup d'ouvrages et d'articles, surtout anciens, portant sur les roches volcaniques à structure vitreuse, suite à un refroidissement rapide, les sphérolites sont interprétées comme résultant d'un processus de dévitrification. C'est un processus extrêmement lent, à l'échelle des temps géologiques ! Ce ne peut pas être le cas dans les tufs du « piperno » que nous avons étudiés. En effet, sauf cas particuliers mentionnés au début du § 3.5, les sphérolites sont absentes dans les tufs ignimbritiques, voisins immédiats du piperno et de même composition. Les microsphérolites observées résultent donc d'un processus de cristallisation lors du refroidissement des cœurs de flammes, refroidissement nettement plus lent que celui de l'émulsion magmatique à l'origine des tufs ignimbritiques. Elles sont de deux types bien identifiables : les sphérolites d'orthose et celles de quartz, et la texture est felsitique.

Cette conclusion sera renforcée dans l'examen des phénomènes de cristallisation que nous examinerons dans le prochain article sur les rhyolites fluidales. Le phénomène de séparation, lors de la cristallisation, des phases orthose et quartz, apparaîtra comme un caractère fondamental du processus, et sera expliqué par la thermodynamique du système binaire orthose-quartz, au voisinage de son eutectique.

## Bibliographie

- BORDET P. (1951) – *L'Estérel et le massif du Tanneron. Géologie régionale de la France*. Paris, Hermann éd.  
BOUCARUT M. (1971) – *Étude volcanique et géologique de l'Estérel (Var, France)*. Thèse d'État, Nice.

VERNON R. H. (2004) – *A practical guide to Rock Microstructure*. Éd. Cambridge.

MOINE M. (2008) – *Découverte du volcanisme permien de l'Estérel en suivant la piste de la série magmatique*. À consulter sur le Web.

CREVOLAT G. (2010) – *Le volcanisme rhyolitique du massif de l'Estérel : évolution des connaissances. En hommage au Professeur Marc Boucarut*. Institut Egid. Université de Bordeaux.

Notice de la carte géologique BRGM, Fréjus-Cannes, n° 1024, 1994.

FOUCAULT A. et RAOULT J.-F. (2010) – *Dictionnaire de géologie*, Masson.

SAGA (2018) – *Atlas pétrographique de l'Estérel*. Atlas pétrographique, site Web de la SAGA.

Crédit photo. Les clichés et dessins sont de l'auteur, sauf mention particulière.

### Remerciements

Ma reconnaissance va aux membres de la petite équipe de l'Atlas pétrographique, qui m'ont aidé et soutenu tout au long de la réalisation du chapitre Estérel : Danielle Piaud, Roland Mahéroult et Hélène Quéré, ainsi qu'à Jacques Vallée pour son aide à l'installation sur le site Web de la SAGA.

# LA CHAÎNE DES PUY, PATRIMOINE MONDIAL DE L'HUMANITÉ



Cela faisait une dizaine d'années que le Conseil départemental du Puy-de-Dôme cherchait à recevoir ce label. La troisième candidature a enfin été la bonne. Le comité de l'Unesco a validé, lundi 2 juillet 2018, l'inscription de la Chaîne des puy au patrimoine mondial de l'humanité.

Validé le 28 mai par l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN), le projet a aussi été reconnu comme étant un site géologique exceptionnel par l'Unesco, représentant toutes les étapes de formation d'un rift, une rupture continentale.

La Chaîne des puy-faille de Limagne devient ainsi le 44<sup>e</sup> site français inscrit au patrimoine mondial. En revanche, il s'agit du premier bien naturel classé dans l'Hexagone, hors DOM-TOM et Corse.

Haut lieu tectonique, paysage bien connu des Français... et de bien des membres de la SAGA, le site classé regroupe un chapelet de 80 volcans endormis, vieux de 8 400 à 95 000 ans, et une faille âgée de 35 millions d'années et profonde de 3 000 m ; le tout sur plus de 240 km<sup>2</sup>.

« Cette fois, c'est une victoire sans bavure », s'enthousiasme Jean-Yves Gouttebel, président du Conseil départemental du Puy-de-Dôme et porteur du projet. « Ce sont bien sûr le bonheur et la joie qui dominant. Une joie partagée avec l'ensemble des forces du territoire, des habitants aux entreprises, qui ont soutenu le projet. C'est l'aboutissement de onze ans de travail. »