

# Le massif de l'Estérel

## Introduction

Les manifestations du magmatisme dans l'Estérel sont multiples au cours des temps géologiques. Nous n'avons retenu que les deux principales.

- La première s'impose dans les paysages de la région, c'est le **volcanisme permien** qui s'est développé à la faveur de la phase distensive de la fin du Paléozoïque. Il a été accompagné par la formation de grands édifices de tufs rhyolitiques aux vives couleurs rouges et orangées, de type acide (exemple Mont Vinaigre). Ces tufs appartiennent à une série alcaline sursaturée, riche en alumine. Ce volcanisme original par sa dynamique éruptive de type plinien, permet au pétrographe de s'initier aux roches volcaniques si particulières que sont les **rhyolites ignimbrtiques** et les **rhyolites fluidales**. Nos prélèvements ont été limités aux coulées notées <sup>5</sup>p, <sup>7</sup>p, <sup>10</sup>p et <sup>11</sup>p, principaux niveaux stratigraphiques de la **carte géologique BRGM Fréjus-Cannes N° 1024**. Dans la section du volcanisme permien, nous indiquons les méthodes utilisées pour caractériser et déterminer ces rhyolites ignimbrtiques ou fluidales.

A la fin du cycle permien, se déroule une phase éruptive modeste, de type basique. Elle appartient également à une série alcaline, avec principalement des roches de type **hawaïite/mugéarite**. Elle a le mérite d'être facilement observable sur la côte à l'est de Saint-Raphaël et se traduit par des coulées et des filons.

- La seconde manifestation étudiée dans l'atlas est celle de l'**estérellite** qui est très différente. Les beaux galets colorés d'estérellite ne passent pas inaperçus pour les visiteurs de la plage de débarquement du Dramont à l'est de Saint Raphaël. Ce magmatisme est de type hypovolcanique, localisé géographiquement sous la forme d'un petit pluton et de ses laccolites satellites. Sa série est calco-alcaline et est liée à un contexte orogénique compressif de l'Eocène.

## Le volcanisme permien

### Localisation des prélèvements

Les prélèvements ont été effectués sur la côte à l'est de Saint-Raphaël et au Mont Vinaigre (voir la carte routière **figure 1**).

- **La côte à l'est de Saint-Raphaël, entre Boulouris et Dramont**

Les **figures 2 et 3** sont extraites de la carte géologique. Elles montrent l'ensemble des affleurements volcaniques et hypovolcaniques (estérellite en bleu) sur la région côtière et dans l'arrière-pays, au sein des grès et conglomérats du Permien, dominants.

La **figure 3** donne le détail de la carte géologique côtière entre Boulouris et Dramont, où l'on accède aux tufs rhyolitiques. Les affleurements du volcanisme basique tardi-permien sont plus que discrets, ce sont les filons notés <sup>6</sup>F et la petite enclave notée <sup>4</sup>H. Le **tableau 1** donne les numéros des lames minces.

- **Le Mont Vinaigre**

La **figure 4** indique la localisation de six prélèvements sur la route qui conduit de la maison forestière du Malpey au sommet du Mont Vinaigre.

Voir le **tableau 2** et la coupe du Mont Vinaigre, **figure 6**. Les termes utilisés sont expliqués dans le paragraphe « *Singulières rhyolites ignimbrtiques et rhyolites fluidales : comment les caractériser ?* ». Les symboles pour désigner les différents dépôts de tufs rhyolitiques et les coulées de rhyolite fluidale (pyroméride) sont ceux de la notice de la carte géologique.

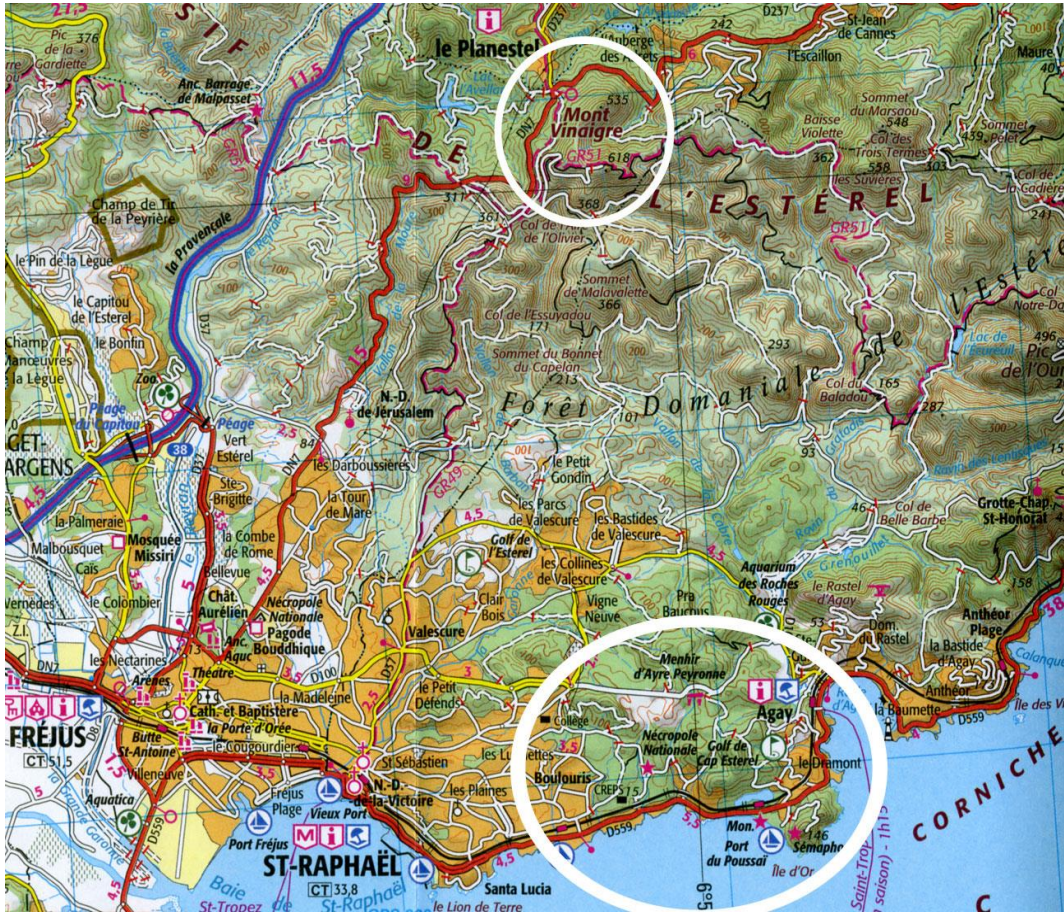


Figure 1 : Carte routière du massif de l'Estérel

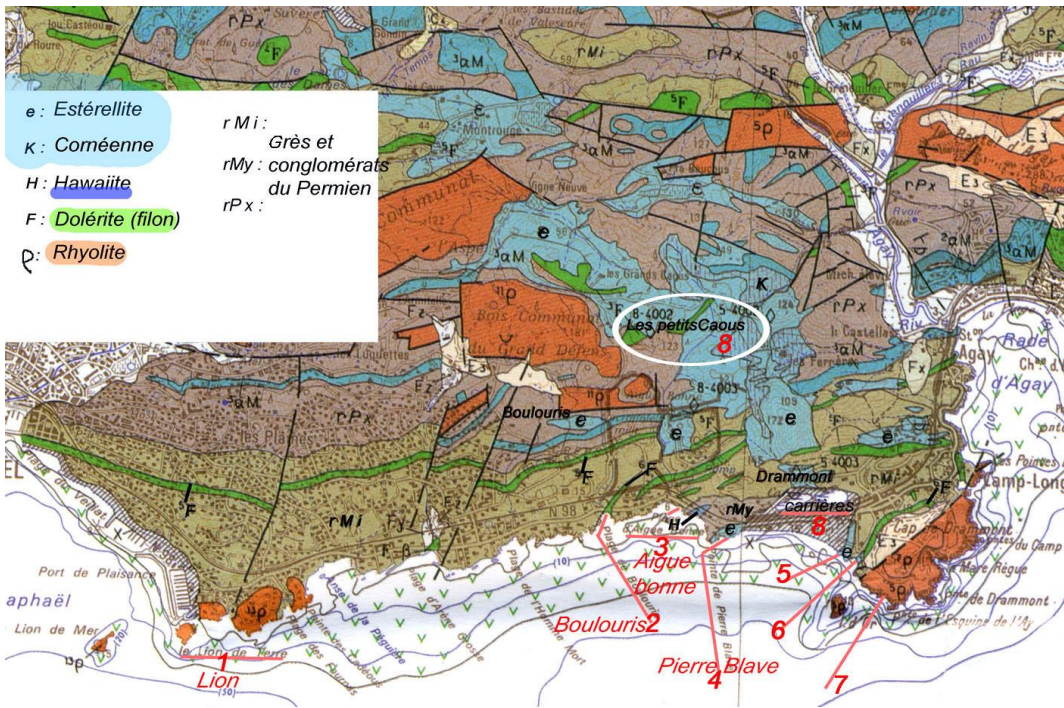


Figure 2 : Extrait de la carte géologique BRGM Fréjus-Cannes

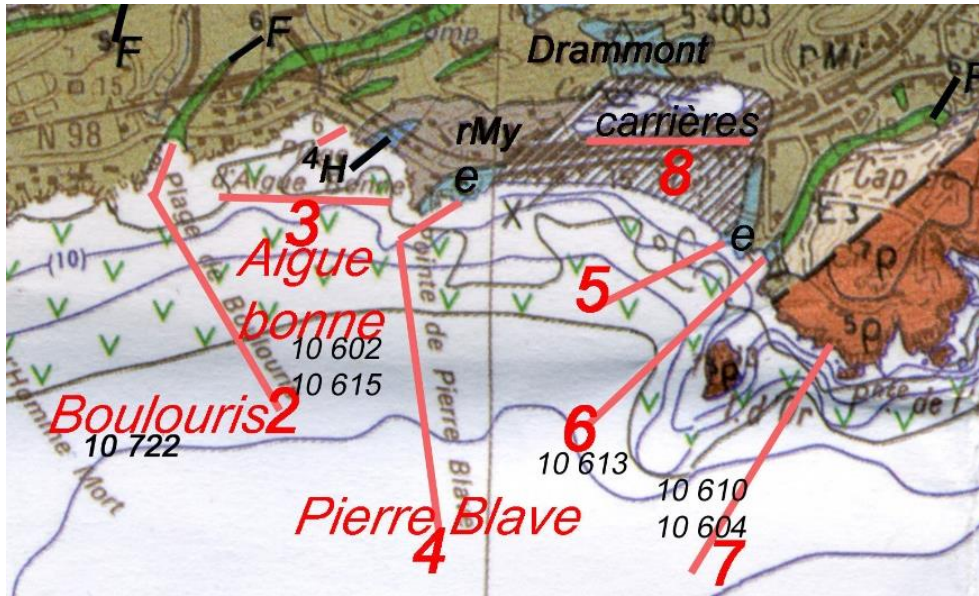


Figure 3 : Localisation des prélèvements entre Boulouris et Dramont

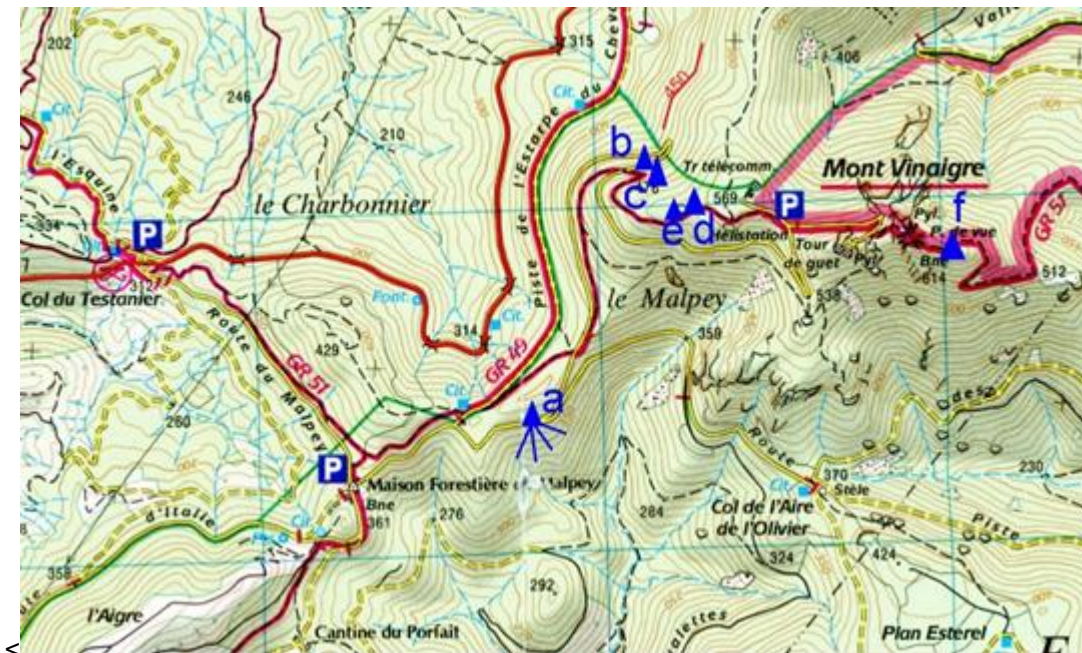


Figure 4 : Localisation des prélèvements au Mont Vinaigre

Zone et lieu-dit	Numéro lame mince	Nature
Zone 2, Boulouris	10722	<b>Hawaïite</b>
Zone 3, Aigue Bonne	10602 10615	Projections et coulée boueuse (lahar) de <b>hawaïite</b>
Zone 6, petite crique Dramont	10613 (non décrit)	<b>Tuf rhyolitique vert <sup>5</sup>p</b>
Zone 7, petite crique Dramont	10610 10604	<b>Tuf rhyolitique rouge <sup>5</sup>p</b>

**Tableau 1 : Prélèvements entre Boulouris et Dramont**

Repère	Numéro lame mince	Nature
<b>a</b> : Parking au-dessus de la maison forestière du Malpey Altitude = 350 m	10606	<b><sup>7</sup>p</b> : grande coulée d'ignimbrite
<b>b</b> : N 43.502 15, E 006.811 78 Altitude = 497 m	10608	Brèche de débouillage de la cheminée du volcan (voir figure 5) <b><sup>11</sup>p</b> : rhyolite fluidale, <b>pyroméride</b>
<b>c</b> : N 43.502 15, E 006.811 78 Altitude = 497 m	10617 (non décrit)	Coulée recouvrant la brèche de débouillage (voir figure 5) <b><sup>7</sup>p</b> : nuée ardente d'ignimbrite
<b>d</b> : Altitude = 550 m	10616	<b><sup>10</sup>p</b> : <b>piperno</b> rhyolitique, <b>flammes</b> aphyriques à cœur de ponce
<b>e</b> : Vers 500 m	10609 (non décrit)	<b><sup>7</sup>p</b> : nuée ardente d'ignimbrite lie de vin
<b>f</b> : Voisinage du sommet à 605 m, après la faille (voir coupe figure 6)	10618	<b><sup>11</sup>p</b> : rhyolite fluidale, <b>pyroméride</b>

**Tableau 2 : Prélèvements au Mont Vinaigre**

N 43.502 15, E 006.811 78. Altitude = 497 m :  
 débouillage de la cheminée du volcan

Une « coulée »  
 d'ignimbrite (7p)  
 est venue  
 recouvrir la **brèche**  
 ci-dessous

**brèche volcanique**  
 avec blocs de  
**rhyolite fluidale,**  
**(pyroméride) 11p,**  
 cimentés dans  
 la nuée ardente 7p

*Photo Yves Grimault*

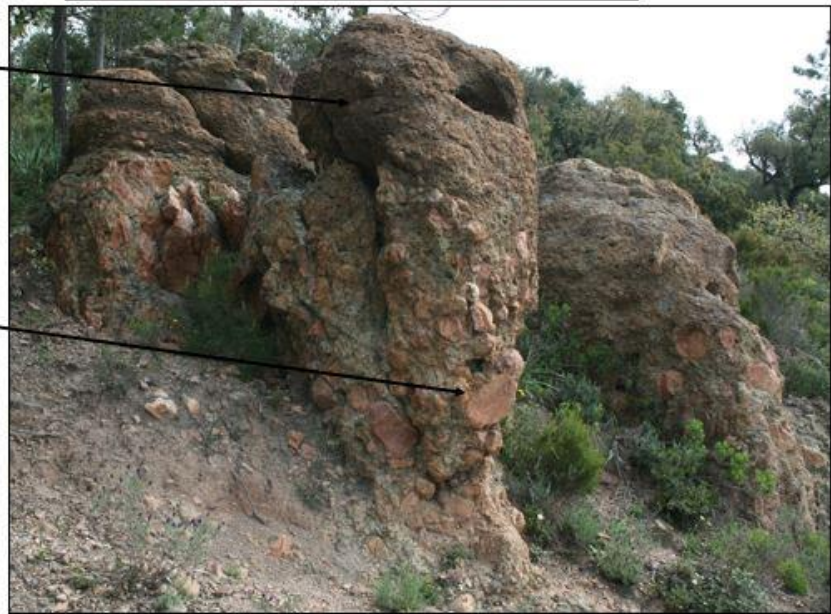


Figure 5 : Affleurements en bord de piste au Mont Vinaigre

Le cliché est pris à l'emplacement du site noté c sur la carte de la figure 4. On aperçoit à la base, dans la brèche de débouillage, les fragments de pyroméride projetés depuis la cheminée éruptive du Mont Vinaigre. Le haut de la cheminée, obstrué par de la rhyolite ignimbritique refroidie, a explosé sous la poussée du magma pyroméridique.

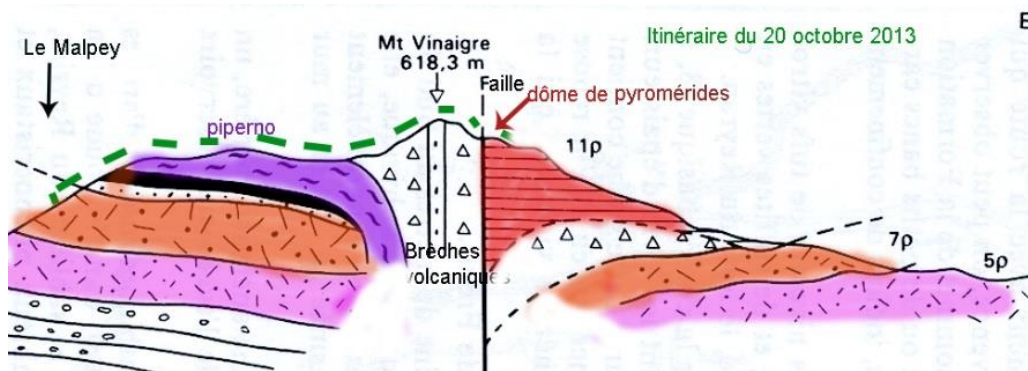


Figure 6 : Coupe géologique du Mont Vinaigre

Cette coupe montre les principaux types de rhyolite, ignimbritique et fluidale, échantillonnés pour les lames minces le long de l'itinéraire parcouru (en trait hachuré vert). Dessin à partir de la notice de la carte géologique.

## Singulières rhyolites ignimbritiques et rhyolites fluidales : comment les caractériser ?

S'agissant des **phénocristaux**, l'examen au microscope paraît simple au premier abord. Quartz et feldspaths alcalins coexistent parfois en grande quantité. Ils sont en général de taille millimétrique à plurimillimétrique, bien que parfois fragmentés. Ils sont faciles à identifier et à compter sur une lame, de façon à évaluer grosso modo leur densité volumique : voir par exemple les lames 10604, 10606 et 10610. On dispose ainsi d'une première donnée, à comparer à celles de la notice de la carte géologique. Le **tableau 3** permet de visualiser la colonne stratigraphique des dépôts et coulées rhyolitiques sur plusieurs centaines de mètres.

Une caractéristique majeure est l'abondance des phénocristaux ( $\emptyset$ ) dans les premières coulées ; la tendance est indiquée par la courbe en tirets.

- Première colonne : Désignation de la rhyolite, de  $1^p$  à  $11^p$ .
- Seconde colonne : Type de rhyolite. **Ign** désigne ignimbrétique et  $\emptyset$  est le pourcentage en volume de phénocristaux. Le symbole **FL** désigne la présence de flammes. **Pyroméride** est le terme ancien pour désigner les rhyolites fluidales (coulées). Ces dernières occupent le sommet de la colonne.
- Troisième colonne : Epaisseur des dépôts.

Le maximum de taux de phénocristaux se produit dans les émissions ignimbritiques du début : les phénocristaux massés au sommet de la chambre magmatique sont expulsés par la poussée des gaz. Après expulsion des gaz, la dernière émission est une vraie coulée de magma à forte viscosité.

11 <sup>p</sup>	$\emptyset < 5\%$ <b>Pyroméride</b>	50 m
10 <sup>p</sup>	$\emptyset < 5\%$ <b>Piperno, FL</b>	200 m
9 <sup>p</sup>	$\emptyset < 5\%$ <b>Ign</b>	100 m
8 <sup>p</sup> , 9 <sup>p</sup>	<b>Pyroméride</b>	5 m
7 <sup>p</sup>	<b>Ign</b> $\emptyset = 40$ à $50\%$	150 à 300 m
6 <sup>p</sup>		3 m
5 <sup>p</sup>	<b>Ign</b> $\emptyset = 30$ à $40\%$	0 à 150 m
2 <sup>p</sup>	$\emptyset = 10$ à $15\%$ <b>Ign</b>	20 à 30 m
1 <sup>p</sup>	<b>FL</b>	2 à 5 m

Tableau 3 : Extrait de la notice de la carte géologique (BRGM N° 1024)

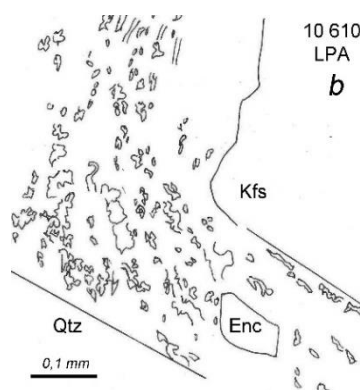
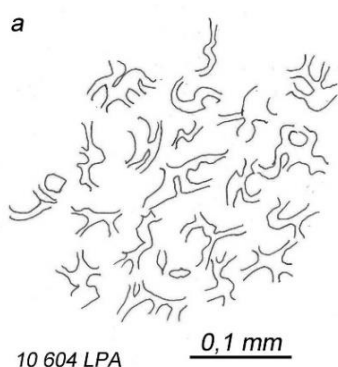
### Rhyolites ignimbritiques

L'étude pétrographique des rhyolites ignimbritiques éclaire leurs conditions d'émission et de dépôt. L'examen au microscope de la mésostase 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 P. Bordet sur la **vallée des Dix Mille Fumées** (voir article Bordet et Tazieff en référence) 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 (voir diagramme TAS, **figure 9**) et donc excessivement visqueux. La clé de l'explication se trouve dans le rôle majeur des gaz occlus dans le magma pendant la phase éruptive du volcan. 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 et de son émulsion dans les gaz ; une grande partie du dépôt se produit par éclatement de petites vésicules de gaz, dont la densité volumique est très élevée dans le liquide. Il s'agit donc d'un état original de la matière magmatique, état fluidifié par les gaz, et dont la rhéologie obéit à des lois propres. Voir par exemple l'article général de Crevola en référence.

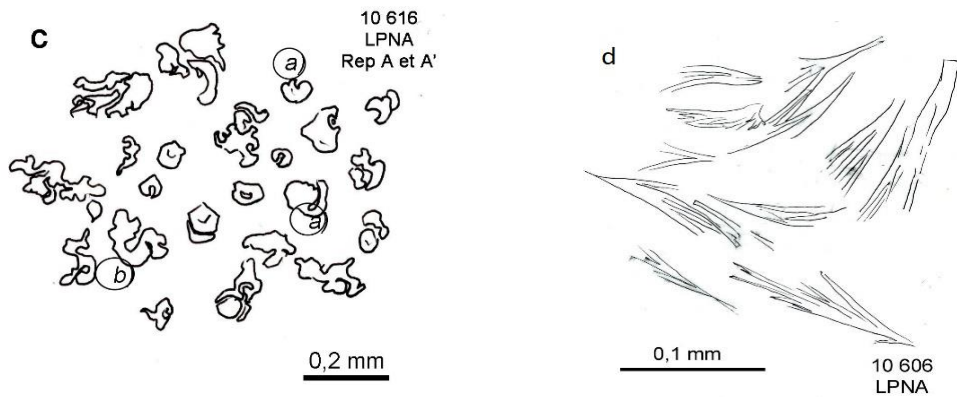
L'étude fine de cet état d'émulsion de magma, mis en suspension puis effondré, écrasé et soudé sur lui-même, est développée dans les fiches descriptives des lames minces de ces tufs ignimbritiques. Un aspect essentiel de ces ignimbrites est leur degré de cristallisation et la structure de la phase microcristallisée, au regard de la phase vitreuse. L'étude est morphologique et passe par l'observation au microscope de microcristallisations insolites, 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.

- Les **échardes**, qui sont les vestiges des vésicules éclatées, plus ou moins écrasés, puis soudés à chaud et recristallisés (observation en LPA). C'est leur observation au microscope qui a conduit à identifier l'état physique particulier des « coulées » de rhyolites ignimbritiques. Elles 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 7a, 7b et 7c**).
- Les **flammes**. Ce 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. Les flammes sont faciles à observer à cause de leurs dimensions macroscopiques, visibles à l'œil nu sur les affleurements. Symbole **FL** sur le **tableau 3**. Voir par exemple les lames 10609 et 10616.
- Les **microlites dendritiques** (**figure 7d**). Ce ne sont pas des échardes mais des microcristallites dispersées dans la masse vitreuse. Leur croissance a été ultrarapide, dans des conditions extrêmes de surfusion et/ou de sursaturation. Voir l'ouvrage de Ron H. Vernon en référence, page 79.



**Figure 7a : Lame mince 10604.** Echardes en X ou de formes complexes, dans la rhyolite ignimbritique 5p de la baie du Dramont.

**Figure 7b : Lame mince 10610.** Echardes fantômes, écrasées, en structure fluidale moulant les phénocristaux (Qtz = quartz, Kfs = sanidine et Enc = enclave), dans la rhyolite ignimbritique 5p de la baie du Dramont.



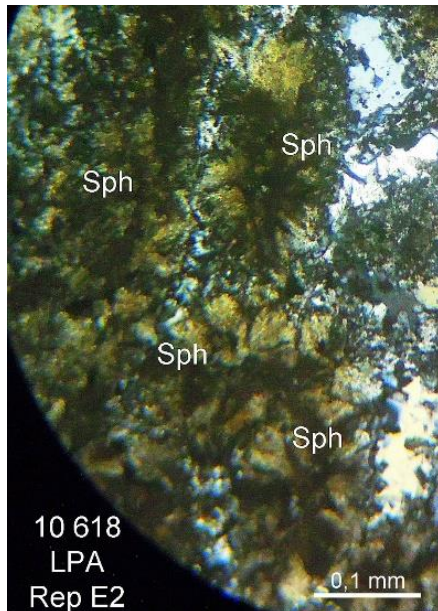
**Figure 7c : Lamme mince 10616.** Microclastes de la phase quartz dans les cœurs de flammes du piperno 10p du Mont Vinaigre. a) : en pelure d'oignon avec une couche concentrique. Le diamètre ne dépasse pas 0,1 mm. b) : en ombilic.

**Figure 7d : Lamme mince 10606.** Microlites dendritiques en « queue de comète » ou en aigrette, dans la rhyolite ignimbritique 7p de la maison forestière du Malpey (Mont Vinaigre).

### Rhyolites fluidales, ou pyromérides

Dans ce cas, les objets déterminants dans l'observation sont les **sphérolites (figure 8)**. Leur alignement fluidal bien marqué, résulte de l'écoulement de la lave en nappes ultra-visqueuses. Les sphérolites sont des petites masses sphériques de diamètre variable, en général inférieur au millimètre, de structure fibro-radiée : elles sont constituées d'un très grand nombre de microcristaux allongés (souvent aciculaires) rayonnant depuis le centre. Elles sont felsitiques c'est-à-dire composées de feldspath potassique (orthose) sur quartz interstitiel, et parfois de quartz. Dans le cas des rhyolites de l'Estérel, elles se sont formées par cristallisation lors du refroidissement lent de la coulée. Voir par exemple les lames 10608 et 10618. Le terme « dévitrification » est parfois utilisé, avec l'idée d'un processus de recristallisation sur des durées longues, éventuellement géologiques. Nous montrons qu'il n'en est rien, et que la formation des sphérolites s'est faite à une échelle de temps qui est celle du refroidissement de la coulée. La structure est en lien étroit avec la composition du magma rhyolitique, proche de l'eutectique du système binaire quartz-orthose (voir la notice de la carte géologique, page 183, la note de calcul de F.Nouyrigat et l'ouvrage de Ron H. Vernon, pages 90 à 101 et 120).

Les **sphérolites** à structure fibro-radiée ne sont pas les seuls objets déterminants dans l'observation des lames 10608 et 10618. Ils sont accompagnés d'une grande variété de structures plus classiques, comme des sphérolites 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. Ces microstructures d'orthose sont associées à de larges plages de quartz pneumatolytique venu combler les cavités laissées par les gaz résiduels dans la lave pyroméridique. Toutes ces microstructures ont en commun le même processus de formation hors d'équilibre : nucléation et croissance d'un magma quartz-feldspathique au voisinage de la composition de l'eutectique, dans des conditions de forte surfusion et/ou de forte surstauration. Voir l'ouvrage de Ron H. Vernon aux pages 90 à 101.

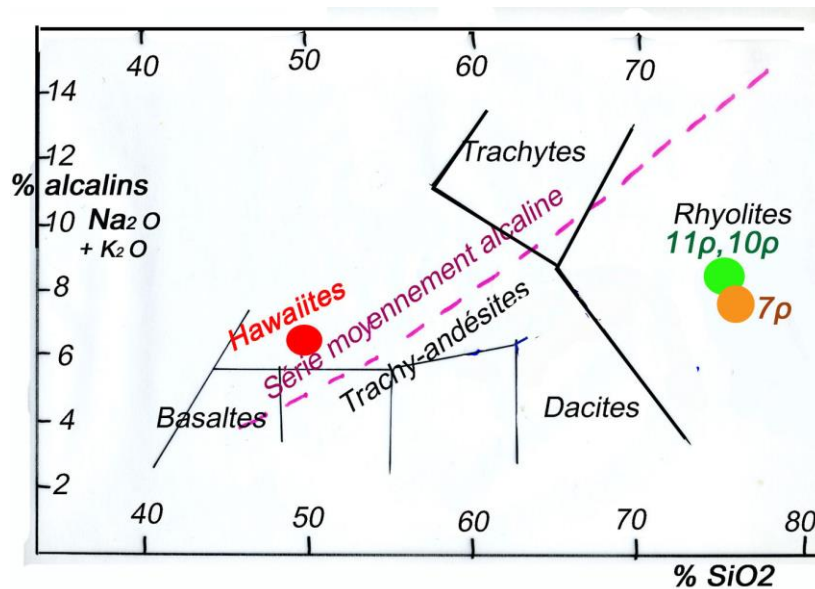


**Figure 8 : lame mince 10818**

Cliché en LPA d'un alignement fluidal de sphérolites dans la pyroméride du sommet du Mont Vinaigre.

Noter la couleur brun-jaunâtre des sphérolites d'orthose aciculaire, qui se détachent sur le fond de cristaux de quartz interstitiel entre microlites d'orthose. Il n'y a aucune phase vitreuse.

**Série volcanique alcaline du Permien de l'Estérel**



**figure 9 :**  
TAS

**Diagramme**

En rouge, volcanisme basique tardi-permien de Aigue Bonne.

En vert et en orange, les rhyolites ignimbritiques de l'Estérel. Elles sont remarquables par leur très haut taux de silice. L'autre caractère remarquable est la forte prédominance de  $K_2O$  sur  $Na_2O$  dans les alcalins.

## L'hypovolcanisme de l'Eocène, l'estérellite

L'extension de l'estérellite, notée par la lettre **e**, est visible sur les cartes des **figures 2 et 3**. Les numéros des lames provenant de la côte sont indiqués sur la carte de la **figure 10**.

D'autres prélèvements ont été faits dans la carrière des Petits Caous, voir la carte de la **figure 2**. Les cartes sont complétées par le **tableau 4**.

L'estérellite appartient à une série calco-alcaline.

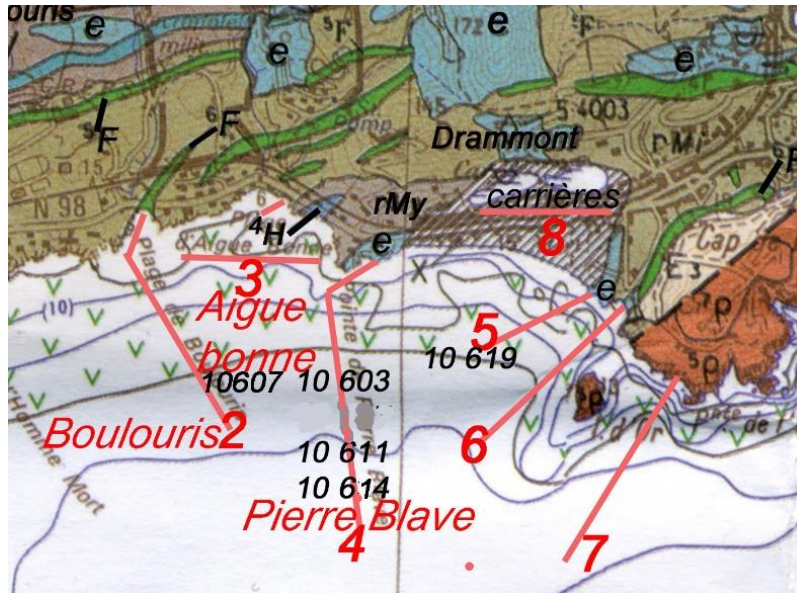


Figure 10 : Localisation des prélèvements d'estérellite sur la côte

Zone et lieu-dit	Numéro lames mince	Nature
Zone 3, Aigue Bonne (roche volante)	10607	Estérellite à amphibole
Zone 4, Pierre Blave (sur la côte)	10603 10611 10614	Estérellite à amphibole
Zone 5, Drammont, plage du débarquement	10619	Estérellite à amphibole
Carrière des Petits Caous (dans l'arrière-pays)	10817 10825 (décrit avec 10817) 10826	Estérellite à épidote

Tableau 4 : Prélèvements d'estérellite

L'étude de ces roches porphyriques se fait de façon classique, comme pour une roche volcanique :

- Description de la roche massive, fluidalité éventuelle.
- Identification et comptage des phénocristaux. Minéraux accessoires.
- Description de la mésostase.

Dans le cas présent, l'attention a porté sur les variations de dimension et de densité des phénocristaux, et sur les différents états de cristallisation de la mésostase. Enfin sur les différences entre les deux localisations (Pierre Blave vs. Petits Caous), en relation avec le rétro-morphisme qui a déstabilisé et transformé les pyroxènes puis les amphiboles du protolithe. Ce rétro-morphisme a opéré en présence de fluides hydrothermaux circulant lors de la mise en place du pluton.

## Bibliographie

Bordet P. et Tazieff H. (1963). *Remarques sur l'éruption du Katmaï et de la vallée des Dix Mille Fumées et sur le problème des ignimbrites*. Bull. Soc. Géol. Fr., VI pp. 397-401.

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

Carte géologique BRGM, Fréjus-Cannes, N° 1024, 1994.

Francis Nouyrigat (2017). *Note de calcul sur la position des rhyolites dans le diagramme de phase orthose/quartz*. Communication personnelle.

Ron H. Vernon (2004). *A practical guide to Rock Microstructure*. Ed. Cambridge.