

LE VOLCANISME RHYOLITIQUE DU MASSIF DE L'ESTEREL : EVOLUTION DES CONNAISSANCES

Gilbert CREVOLA
Institut EGID, Université Bordeaux 3, 33607 PESSAC
crevola@egid.u-bordeaux3.fr

En hommage au Professeur Marc Boucarut

INTRODUCTION

L'Estérel peut être présenté comme un « *millefeuille* » géologique formé par l'empilement, dans un bassin d'effondrement, de niveaux de sédiments détritiques et de niveaux de roches volcaniques basiques et acides. Parmi celles-ci, les *rhyolites amarantes* sont emblématiques de ce massif. En raison de leur extension, de leur épaisseur et de leur résistance à l'érosion, elles forment l'essentiel des reliefs et leur couleur rouge confère aux paysages un cachet particulier qui a contribué à la célébrité de cette partie de la Riviera (fig. 1). La très riche géologie de l'Estérel, avec ses nombreuses curiosités pétrographiques, a suscité de nombreux travaux depuis un siècle et demi. Elle nous est surtout connue par trois mémoires importants, ceux de Michel-Lévy (1912), de Bordet (1951) et de Boucarut (1971), chacun d'eux apportant des données géologiques nouvelles et précisant la cartographie du massif. Cet article rend



Fig. 1 : Paysage classique des rhyolites amarantes de la corniche de l'Estérel.

hommage au professeur Marc Boucarut. Enseignant-chercheur à l'Université de Marseille, puis de Nice, il a réalisé, dans le cadre de sa thèse d'Etat (1971), une nouvelle étude de l'Estérel où il a développé une vision moderne de son volcanisme, en introduisant des concepts volcanologiques nouveaux. Ses travaux ont permis de résoudre les principaux problèmes que posait à l'époque la mise en place des roches volcaniques, en particulier celle des rhyolites amarantes et des rhyolites fluidales (pyromérides). Elève de Marc Boucarut, j'ai effectué sous sa direction des recherches dans l'Estérel à un moment où des progrès décisifs ont été accomplis dans la connaissance de son volcanisme. Nous nous intéresserons ici à l'historique de l'étude du volcanisme acide, le plus développé dans l'Estérel, dont la compréhension s'est faite au rythme des avancées de la science volcanologique.

ETAPES DE L'ETUDE DU VOLCANISME DE L'ESTEREL

Les premières reconnaissances

Dans la deuxième moitié du XIXe siècle, à côté de travaux ponctuels qui s'intéressent à des roches particulières, telles que l'estérellite ou les rétinites, la thèse de Wallerant (1989) et la première édition de la carte Antibes à 1/80 000 de Potier (1877), proposent les premières vues d'ensemble de la géologie du massif. Ces auteurs présentent une stratigraphie encore sommaire et, dans le volcanisme acide, ils distinguent les porphyres quarziteux, ou pétrosiliceux qui couvrent de grandes surfaces, des pyromérides en gisements plus ponctuels.

Les monographies détaillées

Les mémoires de Michel-Lévy (1912), de Bordet (1951) et de Boucarut (1971) traitent de façon détaillée des aspects traditionnels de la géologie de l'Estérel tels que stratigraphie, tectonique et pétrographie. Il s'y ajoute, dans celui de Boucarut une étude paléo-volcanologique. Ces travaux sont valorisés par la publication de cartes de plus en plus précises : respectivement la 2ème édition de la feuille Antibes à 1/80 000 (1914), la 3ème édition de la feuille Antibes à 1/80 000 (1967) et la 1ère édition de la feuille Fréjus-Cannes à 1/50 000 (1966), la 2ème édition de la feuille Fréjus-Cannes à 1/50 000 (1994).

Une synthèse volcanologique moderne

Boucarut propose une stratigraphie très détaillée comportant 33 niveaux principaux au lieu de 24 pour Bordet. Il distingue 13 formations de roches acides (fig. 2), notées de A1 à A13 (A pour acide), contre 5 pour Bordet, notées de R1 à R5 (R pour Rhyolite). En particulier, il distingue deux niveaux très épais de rhyolite amarante, notés A5 et A7, au lieu d'un seul, le R3 de Bordet. Il montre que ce volcanisme intervient dans un fossé d'effondrement (ou *rift*) qui s'étend depuis Cannes jusqu'au Luc, l'un des témoins de la distension postvarisque en Europe. Les résultats les plus importants de ces travaux concernent la mise en place et la pétrogenèse des trois types de magmatisme :

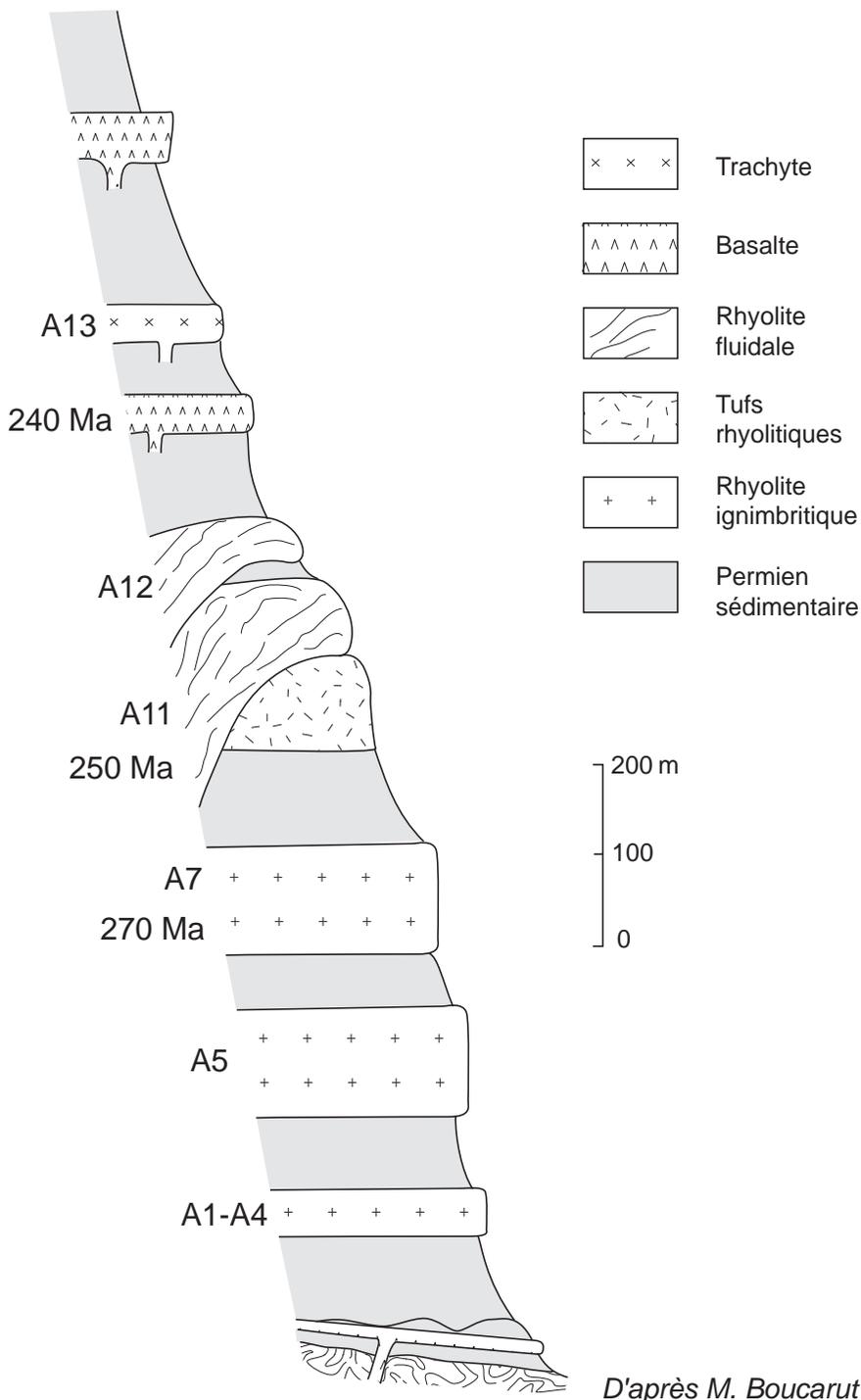


Fig. 2 : Stratigraphie simplifiée de l'Estérel.

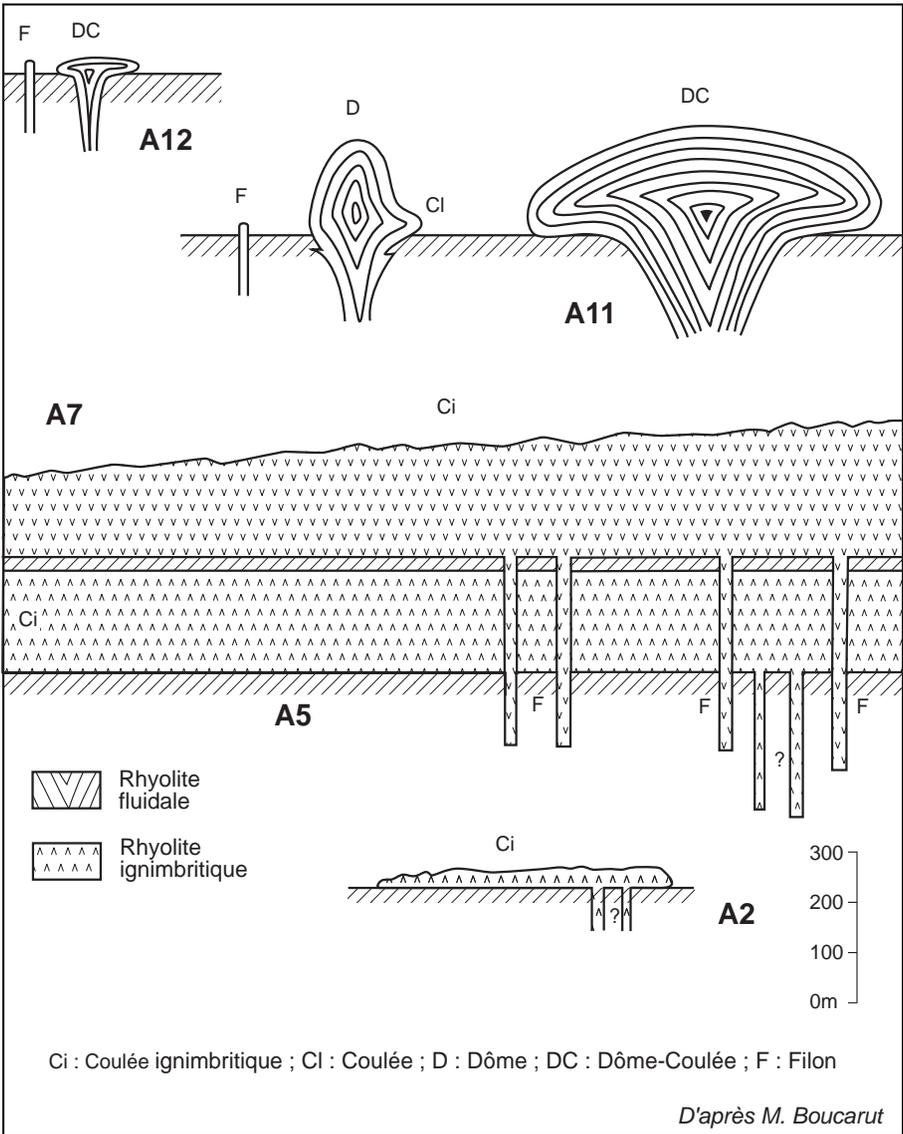


Fig. 3 : Mode de mise en place des rhyolites de l'Estérel.

- le volcanisme acide, avec ses deux types de rhyolites à la mise en place contrastée : rhyolites ignimbritiques à grande extension et rhyolites fluidales (pyromérides) laviques et ponctuelles;
- le volcanisme basaltique différencié, en filons-couches intrusifs et en coulées aériennes à sous-lacustres;
- le magmatisme de l'estérelite, sous forme d'intrusions stratiformes, dont l'âge post-permien est démontré par des relations de terrain.

Magmatisme et géodynamique permien

Après cette nouvelle étude, l'Estérel va être replacé dans un cadre géodynamique et magmatologique régional plus vaste. Des comparaisons pétrographiques et structurales ainsi que des données paléomagnétiques et géochronologiques ont permis de montrer la parenté de la Provence cristalline avec la Corse et la Sardaigne (Westphal *et al.*, 1976). Ces trois régions, initialement réunies au Primaire, vont être séparées à la suite de l'ouverture du mini-océan du golfe de Gênes (33-21 Ma) et de la rotation antihoraire de 30° de l'ensemble corso-sarde au Miocène (21-17,5 Ma).

Le magmatisme alcalin corse (d'âge permien) à granites, rhyolites ignimbritiques et gabbros associés en complexes alcalins subvolcaniques, est comparable par son chimisme et son âge au magmatisme permien de l'Estérel (Vellutini, 1977; Gondolo, 1984 ; Poitrasson et Pin, 1998). L'enclave de granite alcalin, découverte au sein de l'estérellite de Pierre Blave (le Drammont), de même type que les granites alcalins corses, à la même composition chimique que les rhyolites. Elle peut être considérée comme un équivalent plutonique des rhyolites, ce qui suggère la présence aussi dans l'Estérel d'une association alcaline volcano-plutonique. Ainsi, ces données montrent l'existence d'une province magmatique permienne provenço-corso-sarde unique, qui sera démantelée au Tertiaire. Les similitudes avec le magmatisme corse ont amené Vellutini *et al.* (1976) à interpréter la structure de l'Estérel, postérieurement à la mise en place des rhyolites ignimbritiques, comme un « *cauldron* ». Cependant, en 1984 Gondolo, qui a de nouveau étudié la structure de l'Estérel, revient à une structure de rift classique. Des études géochimiques et isotopiques des roches volcaniques de l'Estérel (Poitrasson et Pin, 1998) montrent que les rhyolites n'ont pas de relation avec le volcanisme basique et qu'elles proviennent du mélange d'un magma évolué dérivé du manteau et d'un magma issu de la fusion de la croûte inférieure.

LA MISE EN PLACE DES RHYOLITES IGNIMBRITIQUES

La saga des ignimbrites

« Le plus grand progrès réalisé en paléovolcanologie durant le XXe siècle a été l'élucidation de l'origine des ignimbrites. »

*E.F. Cook
Académie nationale des sciences des USA, 1966*

L'éruption meurtrière de la Montagne Pelée du 8 Mai 1902 permit de définir un type nouveau d'activité magmatique, celui des nuées ardentes, qui consiste en un transport de fragments solides de toutes tailles dans un gaz (phénomène appelé suspension en physique). L'éruption du 6 au 8 Juin 1912 du Novarupta (ou Katmaï) en Alaska, qui s'est déroulée sans témoins oculaires fut l'une

des plus importantes des temps historiques par le volume des matériaux émis (13 km³) et leur épaisseur (jusqu'à 200 m). De brève durée (3 jours), elle montre le remplissage par des tufs d'une vallée (qui sera baptisée « *Vallée des Dix Mille Fumées* » en raison des nombreuses fumerolles qui s'échappaient encore des tufs chauds après plusieurs années). Les études successives des produits de cette éruption ont permis de définir progressivement un type de mise en place apparenté aux nuées ardentes, qualifié dans un premier temps de « *coulée de sable incandescente* » ou de « *coulée de boue incandescente* ».

Les caractéristiques de ces tufs vont être rapprochées de celles de roches énigmatiques, à structure de tuf mais à morphologie de coulée, décrites dès le milieu du XIXe siècle dans les Canaries, la région de Naples ou l'ouest des Etats-Unis. Lacroix, en s'appuyant sur les descriptions de la Vallée des Dix Mille Fumées, donne en 1930, une image devenue classique de la nuée « *kat-maienne* » : « ...les gaz contenus dans le magma... se seraient dégagés, non pas brusquement, grâce à des explosions violentes, mais d'une façon relativement tranquille, 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. ».

Le terme *ignimbrite* (littéralement « *pluie de feu* », du latin *ignis*, feu et *imber*, pluie) originellement proposé en 1935 pour ce type de mise en place, va peu à peu s'imposer par rapport à d'autres termes tels que : tufolaves, tufs soudés, coulées de cendres. Les caractères et le mode de mise en place des ignimbrites vont être progressivement précisés, grâce à de nombreux travaux et le concept sera figé au début des années 60 (Smith, 1960 ; Chouber, 1963). Une nouvelle étude de la Vallée des Dix Mille Fumées (Bordet et Tazieff, 1963 ; Bordet, 1966) servira de référence, au moins en Europe, pour la description du phénomène et les caractères des roches qui en résultent. « *On peut conclure que la masse entière des matières émises est passée, antérieurement à sa pulvérisation, par un stade de mousse (stade pré-ignimbritique) conservé seulement dans les ponces; ce stade comporte une phase liquide continue englobant une multitude de petites bulles gazeuses. C'est probablement la dilatation excessive de ces bulles, associée aux déformations de l'ensemble, qui a provoqué la pulvérisation de la masse et la transformation en un continuum présentant une phase gazeuse continue, chaude et à basse pression, contenant en suspension de minuscules fragments liquides à haute viscosité ou même complètement solides...Autrement dit un même magma peut donner naissance suivant les conditions de son émission à des ignimbrites, à des coulées, ou bien à des explosions et à des extrusions... En l'absence d'observations directes jusqu'ici impossibles c'est la convergence de critères morphologiques, tectoniques, pétrographiques, chimiques, qui permettent de conclure qu'il y a bien eu, au cours d'une éruption, émission d'ignimbrites.* ».

Les ignimbrites sont une variété d'*écoulement pyroclastique* (pyroclastic flow, en anglais) comme les nuées ardentes ou les déferlantes basales, mais ici les particules en suspension à très haute température (jusqu'à 1000°C)



Fig. 4 : Aspect des rhyolites ignimbrtiques à l'affleurement. La roche compacte est riche en cristaux et présente quelques enclaves.

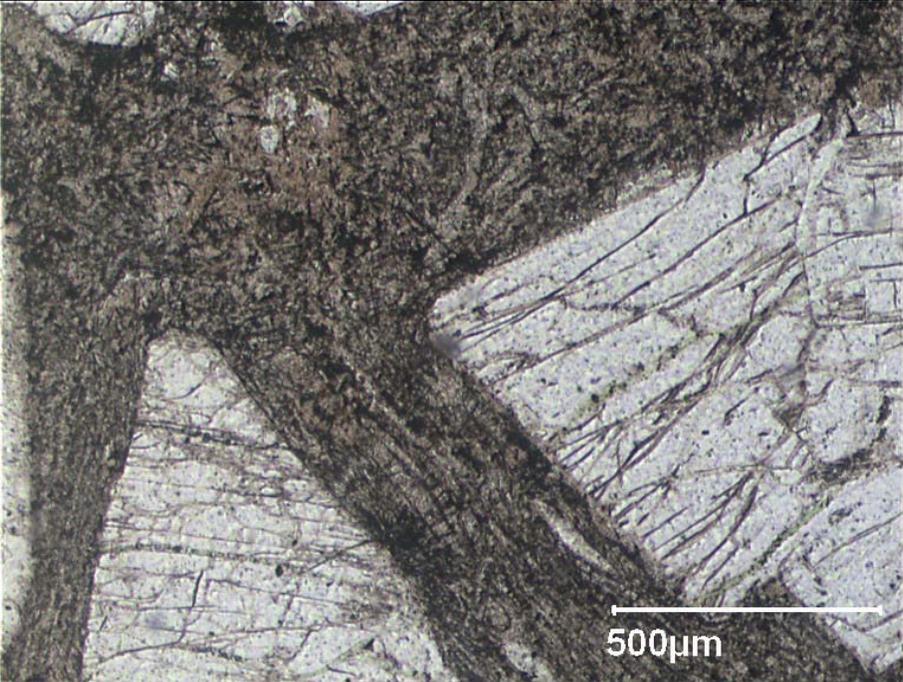


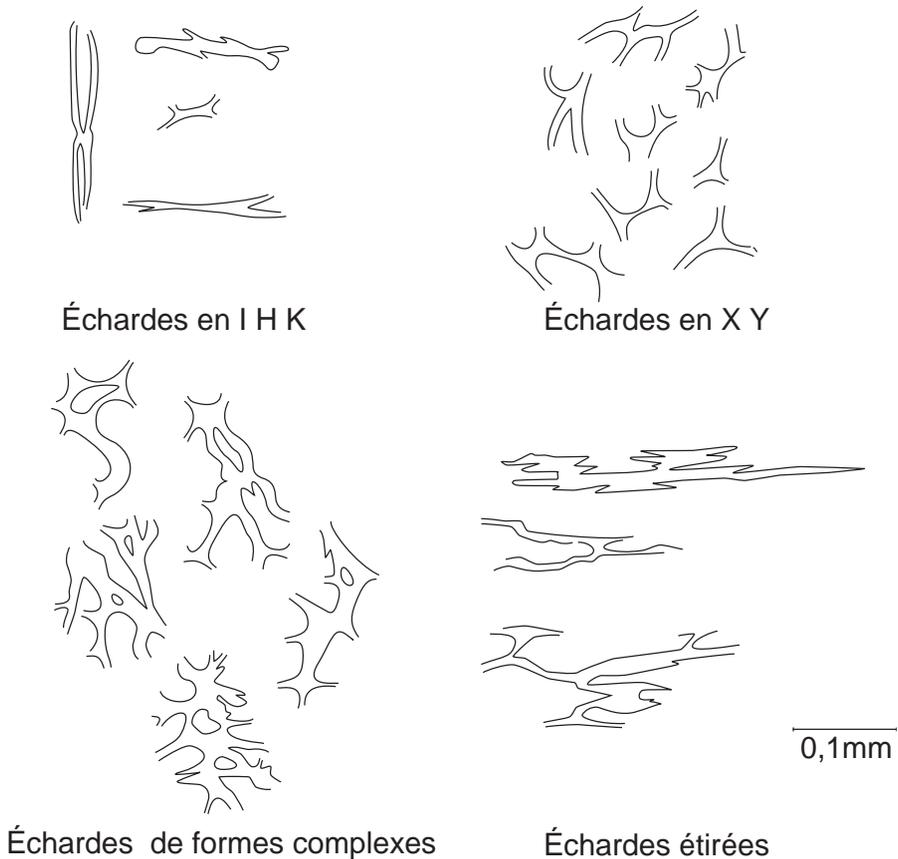
Fig. 5 : Rhyolite ignimbrtique à texture vitroclastique. Sur la photo les écharde de verre dévitrifiées sont soit non étirées, soit étirées entre deux phénocristaux de feldspath.

sont quasi liquides. Le terme ignimbrite est un terme générique qui ne désigne pas une roche de composition donnée, mais un mode de mise en place, ainsi on parlera de *rhyolite ignimbritique*. Elles présentent diverses particularités pétrographiques :

- leur caractère *vitroclastique* dû à l'accumulation des échantons de verre provenant de l'éclatement des parois des bulles d'un magma vésiculé (fig. 5 et 6);
- la soudure et l'étirement par compaction des échantons de verre encore chaudes (fig. 5);
- leur *dévitrification* lors du refroidissement.

On utilisera le terme de *coulées ignimbritiques* car elles se présentent avec un toit plat et occupent des surfaces allant de quelques km² à plusieurs dizaines de milliers de km² (Mexique, ouest des USA, Nouvelle Zélande).

Dès lors les études des ignimbrites vont se multiplier dans toutes les régions volcaniques du globe, utilisant des méthodes de plus en plus perfectionnées, et restent toujours d'actualité aujourd'hui.



D'après M. Boucarut

Fig. 6 : Les types d'échantons de verre dans les rhyolites ignimbritiques de l'Estérel.

L'approche des ignimbrites, en France

Après la seconde guerre mondiale, les géologues français vont s'intéresser aux ignimbrites du territoire national ou des possessions françaises en s'appuyant sur les critères proposés dans les travaux étrangers.

La problématique des ignimbrites est ainsi clairement présentée par Gèze en 1957 :

« La plupart des traités pétrographiques soulignent la contradiction évidente entre la haute viscosité des laves acides et leur gisement fréquent en coulées largement étalées, qui prouveraient au contraire une grande fluidité... En définitive, il semble permis de se demander si une grande partie des laves acides considérées jusqu'à maintenant comme des coulées largement étalées autour des centres éruptifs ne seraient pas en réalité d'anciens produits de projection qui par soudure, refusion, puis dévitrification, auraient donné les aspects sous lesquels nous les connaissons aujourd'hui. ».

Outre-mer les ignimbrites seront reconnues dans le Précambrien du Maroc en 1955 et au Tibesti (Tchad) en 1957. En France, les spectaculaires rhyolites de l'Estérel, bien connues de tous les pétrographes de l'époque, sont rapidement considérées comme d'éventuelles ignimbrites. En 1959, dans une mise au point au titre évocateur « *Ignimbrites permienes de l'Estérel* », Rutten interprète les rhyolites de type R3 (de Bordet) comme des ignimbrites typiques et les dissocie clairement des pyromérides R4 (de Bordet) à texture fluidale caractéristique, mises en place sous forme de coulées vraies. Le même auteur dans un article ultérieur devenu classique (Rutten, 1963), détaillera les différences entre les deux types de rhyolites et mettra en garde contre un engouement trop rapide pour les ignimbrites : « *Le moment est venu, après l'intérêt suscité par les rhyolites ignimbritiques, de rechercher les vraies rhyolites; les coulées de laves acides du passé géologique.* ».

Les travaux français, ainsi que le climat d'émulation scientifique international que suscitait la quête des ignimbrites, ouvrent la voie, guère plus d'une décennie après les travaux de Bordet, à une nouvelle étude du volcanisme rhyolitique de l'Estérel qui sera entreprise par Boucarut. D'autres régions françaises vont également faire l'objet de nouveaux travaux qui vont aboutir à la reconnaissance d'ignimbrites à partir de 1959 (Boyer, 1972) : Vosges, Maine, Vendée, Morvan, Limousin puis Corse et nord du Massif Central.

La caractérisation des ignimbrites dans l'Estérel

Des 7 coulées ignimbritiques de l'Estérel, trois ont des volumes considérables : 60 km³ pour A7, 25 km³ pour A5, 2,3 km³ pour A2 (Gondolo, 1984), qui peuvent être comparées aux 13 km³ de l'ignimbrite « *prototype* » de la Vallée des Dix Mille Fumées.

La rhyolite ignimbritique A7, la plus importante, s'étend depuis le golfe de la Napoule jusqu'aux gorges de Pennafort soit sur 30 km, remplissant totalement le fossé permien, avec des épaisseurs variant de 100 à 200 m. Par rapport à d'autres régions françaises, les coulées sont ici globalement continues, bien qu'affectées localement par des failles. Les paysages structuraux montrent de vastes tables rhyolitiques restées horizontales ou ayant été légèrement basculées ultérieu-

rement. Les coulées ignimbritiques (fig. 3) nappent le paysage antérieur, sans base tuffacée, avec une prismation très grossière et sans fluidalité.

Au microscope elles présentent une texture vitroclastique typique (fig. 5). Les échardes de verre peuvent être étirées par compaction, moulant alors les phénocristaux, pour donner une texture pseudo-fluidale et subir une dévitrification en sphérolites. Elles peuvent contenir des fragments de ponces ainsi que de petites enclaves basiques.

En 1964, Boucarut décrit de nombreux filons à texture vitroclastique sur la bordure NW du massif, au niveau de la faille bordière nord du bassin d'effondrement, qu'il considère comme des conduits d'alimentation pour les ignimbrites A7 (fig. 3).

LA MISE EN PLACE DES RYOLITES FLUIDALES A11 (PYROMERIDES)

« Prise dans son ensemble, la roche a un aspect rubané feuilleté des plus prononcés, et les feuillets qui ont souvent 2 ou 3 mm d'épaisseur sont contournés à la manière de ceux des gneiss et des terrains schisteux. » (Potier, 1877)

Une question liminaire : l'emploi du terme pyroméride

Le terme pyroméride (du grec *puros*, feu et *meros*, partie), en fait pyroméride globale, a été proposé par Haüy (*in* Monteiro, 1814) pour des roches de Corse, en remplacement du terme porphyre globuleux. Il fait référence à la présence dans la roche de deux minéraux, le feldspath et le quartz, associés en agrégats fibroradiés pour constituer de gros sphérolites (ou globes). En l'absence, à l'époque, d'observations microscopiques, ces deux minéraux sont distingués par leurs températures de fusion différentes : le premier est fusible au chalumeau (1066°), le second infusible.

Dans les traités classiques de pétrographie en langue française (Jung, par exemple) les pyromérides sont ensuite définies comme « *des roches vitreuses contenant de gros sphérolites (plusieurs cm)* », l'adjectif globale étant donc devenu implicite.

Dans l'Estérel le terme pyroméride, consacré par l'usage, est utilisé pour désigner des rhyolites fluidales non vitreuses à petits sphérolites inframillimétriques (R4 de Bordet et A11 et A12 de Boucarut) (fig. 8). Ces roches ne correspondent donc pas à la définition des pyromérides, terme qui n'est d'ailleurs employé que par les géologues de langue française. Il convient donc, avec d'autres auteurs (Vellutini *et al.*, 1976 ; Vellutini, 1977 ; Toutin-Morin *et al.*, 1994 ; Mari, 1989) de lui préférer maintenant le terme universel de *rhyolite fluidale* (flow banded rhyolite, en anglais) qui fait référence à la caractéristique macroscopique principale de ces roches, la *fluidalité* (fig. 7) et donc en même temps à son mode de mise en place en coulée vraie.

La mise en place des appareils de rhyolites fluidales

A partir des années 20, l'étude structurale des corps de roches magmatiques est venue compléter leur étude pétrographique. Ce type d'étude, développé



Fig. 7 : Rhyolite fluidale montrant à l'affleurement une fluidalité contournée et un débit en plaquettes (le Pont du Duc).

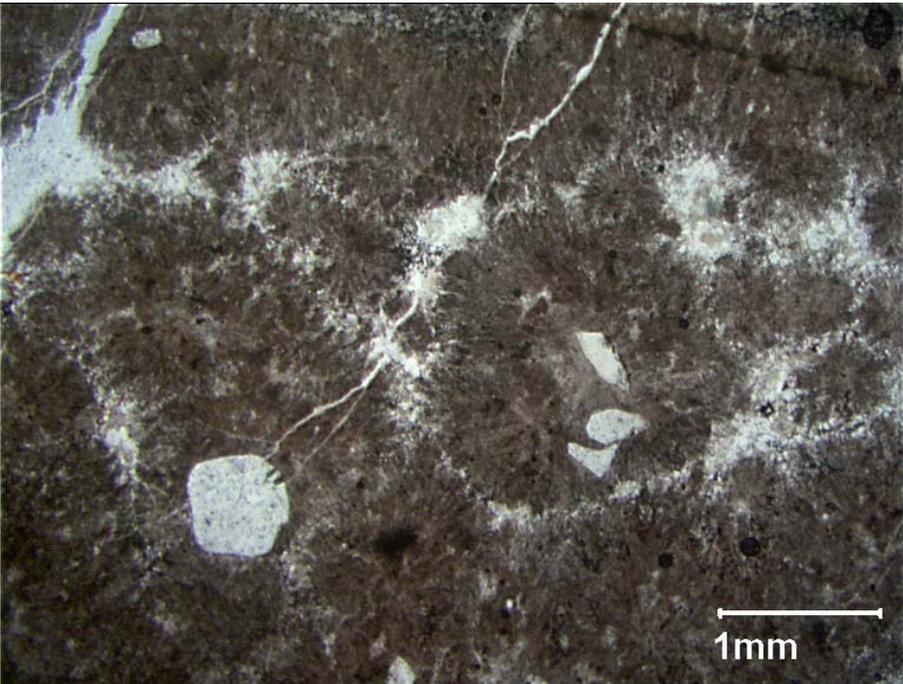


Fig. 8 : Texture sphérolitique dans une rhyolite fluidale.

à l'étranger (Allemagne, Angleterre, USA) avant la seconde guerre mondiale, n'a pris son essor en France que dans les années 60, où il a été appliqué à des intrusions de granitoïdes comme à des appareils et des coulées volcaniques. Son objet est la détermination de la structure des corps de roches magmatiques, souvent érodés, voire arasés, qui traduit l'écoulement du magma visqueux au stade de la mise en place. Elle consiste en la mesure de l'orientation statistique d'objets marqueurs de l'écoulement du magma, tels que les minéraux allongés, les enclaves ou *la fluidalité*, ou de son refroidissement tels que les diaclases ou *la prismation*. Les dômes et dômes-coulées sont des appareils caractéristiques de magmas différenciés, dégazés et visqueux, comme les rhyolites, les trachytes ou les phonolites. Leur observation dans le volcanisme récent à actuel fournit des modèles pour guider l'étude structurale et l'interprétation des appareils anciens (fig. 9).

Dans l'Estérel les premiers auteurs ont interprété les rhyolites fluidales soit comme des coulées (Wallerant, 1889), soit comme des filons (Potier, 1877) en fait sans argumentation précise.

Michel-Lévy en 1912 a distingué les rhyolites fluidales en coulées de celles qui formaient des appareils « en filons et dykes ». Les appareils sont localisés à la bordure nord du massif alors que les coulées sont situées dans le centre et le sud du massif. Par exemple, pour le Mont Vinaigre, l'auteur écrit « *Le dyke du Mont Vinaigre forme donc un appareil de sortie complet comprenant un filon profond, la brèche de sortie, un début de coulée.* ». Son successeur, Bordet, adopte en 1951 un schéma différent : tous les affleurements de rhyolite fluidale sont des lambeaux de coulées disposées originellement de façon rayonnante à partir de l'appareil de Maure-Vieille et les tufs qui les accompagnent sont des scories poussées en avant par la coulée. Ce dispositif, qui implique l'écoulement de la lave acide sur des distances allant jusqu'à 15 km, est difficilement compatible avec sa viscosité élevée.

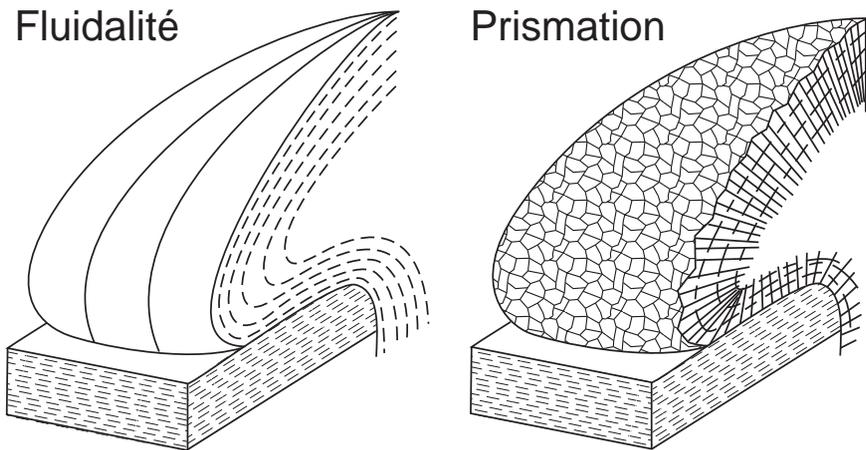


Fig. 9 : Structures des dômes de laves visqueuses avec fluidalité et prismation.

Boucarut (1967, 1971) aborde le problème de la mise en place des rhyolites fluidales par la cartographie détaillée et l'étude structurale de leurs affleurements. La mesure de l'attitude de la fluidalité permet de reconstituer l'écoulement du liquide visqueux, alors que l'orientation de l'axe des prismes indique la disposition des surfaces de refroidissement, encaissant rocheux ou contact avec l'atmosphère (fig. 9). Ainsi, il montre, confortant le schéma de Michel-Lévy, que les rhyolites fluidales constituent des appareils autonomes qui se répartissent en deux grands types (fig. 3) :

- des petits appareils de taille hectométrique répartis sur la bordure nord, de type dôme ou dôme-coulée;
- trois grands appareils de taille kilométrique, en forme de galette passant à de courtes coulées : celui de Maure-Vieille au NE du massif, et ceux de la Louve et de la Cabre au SW.

Deux appareils se prêtent bien à l'illustration des relations fluidalité-prismation et de leur utilisation pour la reconstitution de leur structure originelle : le Mont Vinaigre, où la mise en place des rhyolites est précédée par l'émission de tufs ponceux et de la coulée ignimbritique A10, et l'appareil des Baraques près de St-Jean-de-Cannes (Crevola, 1970) qui est présenté figure 10.

Cet appareil (1500 m x 400 m) est allongé suivant une direction E-W, qui est celle d'une faille qui a guidé sa mise en place. Il correspond à la racine d'un appareil maintenant arasé de type dôme ou dôme-coulée. La mise en place de la rhyolite fluidale est précédée par des émissions de tufs ponceux présents au nord au niveau de la RN 7. Une coulée épanchée vers l'ouest est conservée. L'entaille du ruisseau du Gabre permet d'observer sur une hauteur de 150 m la racine de cet appareil entièrement prismée et le passage à la partie aérienne. La fluidalité se présente en éventail : parallèle aux épontes et redressée à verticale dans la racine, elle s'incline dans la partie aérienne. La prismation, perpendiculaire aux épontes, est faiblement inclinée dans la racine et se redresse vers le haut au passage à la partie aérienne (fig. 10).

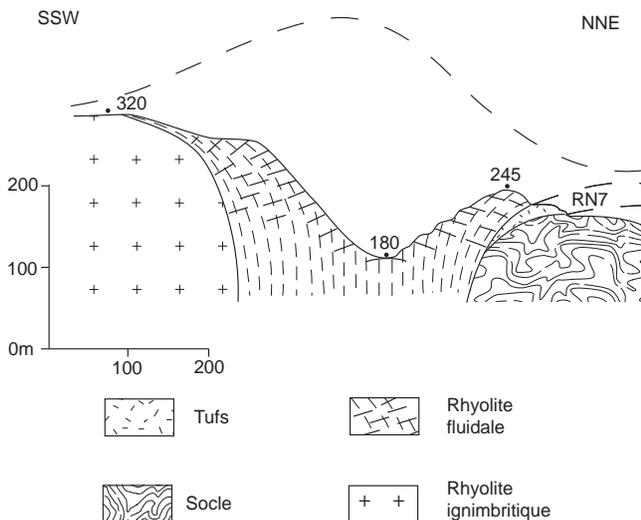


Fig. 10 : Coupe de l'appareil des Baraques montrant sa fluidalité en éventail et l'évolution de sa prismation.

L'appareil de Maure-Vieille et ses dépôts de déferlantes basales

L'appareil de Maure-Vieille se distingue des autres appareils de rhyolite fluidale de la bordure nord du massif par sa taille, son évolution polyphasée et par la présence de formations de tufs stratifiés d'apparence sédimentaire. L'évolution polyphasée de cet appareil a été décrite par Boucarut et présentée dans sa thèse sous forme d'une suite de schémas devenue classique (1971). Ainsi, à une phase initiale pyroclastique à tufs stratifiés donnant naissance à un appareil de type *maar* (volcan surbaissé, constitué de dépôts stratifiés à faible pente entourant un large cratère dans lequel peut se loger un lac), succède la mise en place de tufs ponceux et d'un dôme-coulée de rhyolite fluidale. Elle est suivie d'un effondrement subcirculaire, donnant une caldera d'effondrement à remplissage ultérieur sédimentaire et volcanique.

En fait l'origine de la formation pyroclastique basale est longtemps restée inexpliquée. Le vallon de Maure-Vieille et celui de la Rague en donnent de magnifiques coupes, d'une centaine de mètres de hauteur. Elles montrent les caractères particuliers de cette formation : faible pente (5 à 10°), alternances de lits décimétriques à métriques, les uns à éléments variés du substratum, les autres à éléments volcaniques de type ponceux, figures sédimentaires de type stratifications obliques et antidunes (fig. 11). De telles formations sont caractéristiques des appareils de type *maar*, très répandus dans le volcanisme mondial. L'origine des formations de *maar* devait rester énigmatique jusqu'à la fin des années 60, leur aspect et leurs figures sédimentaires posant des problèmes délicats dans un contexte volcanique.



Fig. 11 : Affleurement montrant les dépôts de déferlantes basales du volcan de Maure-Vieille. On notera les alternances de niveaux à composition différente et la présence d'une antidune.

L'observation d'éruptions *phréatomagmatiques ou phréatopliniennes* (rencontre du magma ascendant avec l'eau souterraine qui est vaporisée de façon explosive ; voir site internet dans la bibliographie), en particulier celle du volcan Taal (Philippines) du 28 au 30 Septembre 1965, a permis de comprendre le mécanisme de *déferlante basale* et l'origine des dépôts pyroclastiques qui en résultent (Moore, 1967). Cette éruption, sert de référence pour ce dynamisme éruptif car l'observation directe de l'éruption a été suivie immédiatement par l'étude des produits mis en place, qui présentent les caractéristiques des formations de maar. Ce mécanisme a été ensuite transposé aux dépôts de maar du volcanisme ancien (Fischer et Waters, 1970). Les déferlantes basales, autres types d'écoulements pyroclastiques, sont des nuages de gaz se déplaçant radialement à la base du panache vertical d'explosion, à des vitesses de l'ordre de la centaine de km/h en transportant des éléments en suspension. Elles les déposent en donnant des dépôts stratifiés avec figures sédimentaires, à la manière des sédiments fins déposés dans les chenaux fluviaux.

La connaissance du mécanisme de déferlante basale a ouvert la voie, à partir de 1970, à de très nombreuses études et ré-études de maars, dans divers contextes magmatiques en accord avec les données de la sédimentologie fluviale. Les dépôts de déferlantes basales de Maure-Vieille ont été les tout premiers dépôts de ce type à être reconnus en France (Boucarut, 1971; Boucarut et Crevola, 1972). En s'appuyant sur les très nombreuses études de cas effectuées depuis 40 ans et les progrès méthodologiques qui les ont accompagnées, il conviendrait maintenant d'affiner l'étude de ces dépôts et d'éclaircir la mise en place des niveaux ponceux qui deviennent dominants vers le haut et leur passage aux tufs ponceux massifs.

Le problème de l'origine de la texture sphérolitique des rhyolites fluidales

La cristallisation des liquides rhyolitiques donne naissance à des rhyolites fluidales sphérolitiques, des rhyolites vitreuses à sphérolites, ainsi qu'à des roches entièrement vitreuses, les obsidiennes et les rétinites (obsidiennes hydratées). La genèse des fameuses lithophyses (Mari, 1989) est liée à celle des sphérolites et intervient lors de la cristallisation de la roche.

Dans les rhyolites fluidales de l'Estérel, la réalisation de la texture sphérolitique avait été interprétée de deux façons différentes :

- pour Michel-Lévy (1912) et Bordet (1952), les sphérolites résultent d'une cristallisation primaire à haute température à partir du magma visqueux. Ces deux auteurs avaient consacré à ce problème des travaux minutieux, conduisant à de longs développements dans leurs mémoires;
- pour Boucarut (1967, 1971), ils se forment par dévitrification lente, au cours des temps géologiques, du verre formé dans un premier temps : « *Je considère que R4 et R5 se sont mis en place sous forme de verre, soit obsidienne, soit rétinite, et que leur structure actuelle de pyroméride est due maintenant au vieillissement.* ».

Les arguments de ces auteurs reposaient essentiellement sur les séquences de cristallisation observées en lame mince et sur la comparaison des textures

des divers types de rhyolites. Ce problème n'a pas suscité de nouveaux travaux depuis 40 ans et les auteurs qui, depuis, se sont intéressés à l'Estérel s'en tiennent à l'interprétation de Boucarut (Toutin-Morin *et al.*, 1994 ; Mari, 1989). Une nouvelle approche de ce problème est maintenant possible en s'appuyant sur des données pétrographiques et expérimentales récentes :

- la cristallisation des liquides rhyolitiques, et la dévitrification des verres acides naturels et artificiels ont été reproduites expérimentalement (Lofgren, 1971 a et b; Watkins *et al.*, 2009). Ces travaux montrent que la cristallisation des liquides rhyolitiques s'effectue à partir d'un *liquide en surfusion* dans un intervalle de quelques centaines de degrés entre la température du *liquidus*, estimée à 1000° (pour les températures : données de Watkins *et al.*, 2009) et celle de la *transition vitreuse* estimée à 750°-620° (fig. 12). En dessous, la cristallisation sphérolitique devient faible voire nulle en raison de l'augmentation de la viscosité qui limite la nucléation et diminue la vitesse de diffusion. Suivant le degré de surfusion on obtiendra des cristaux équants ou tabulaires, des cristaux squelettiques, des dendrites ou des sphérolites (fig. 12) ;

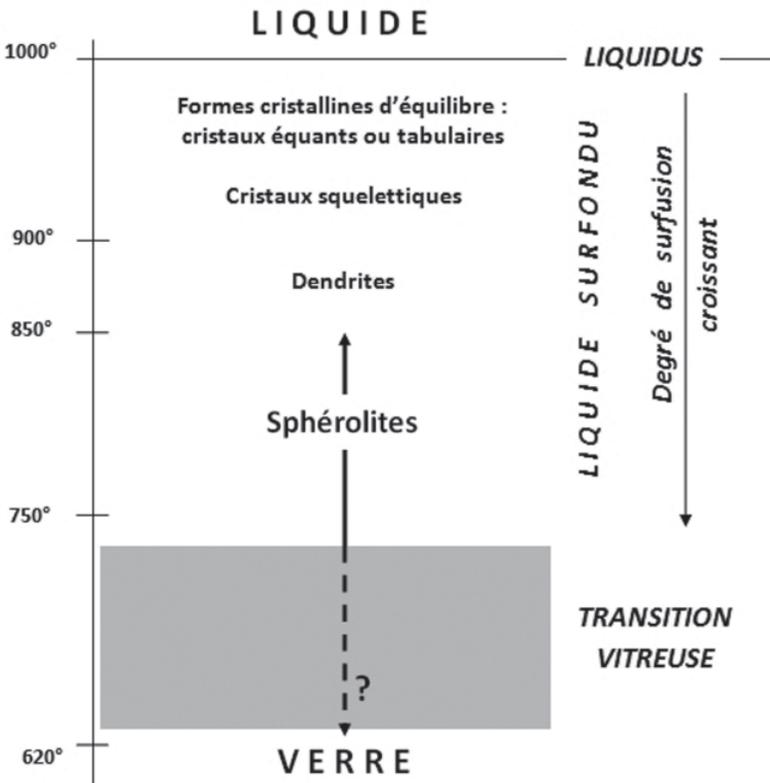


Fig. 12 : Schéma montrant les conditions de cristallisation, en particulier sous forme de sphérolites, des liquides acides, d'après les données expérimentales.

- des études d'appareils, de coulées ou de filons, juxtaposant des rhyolites non ou partiellement vitreuses et des obsidiennes (Manley et Fink, 1987 ; Swanson *et al.*, 1989 ; Smith *et al.*, 2001 ; Gimeno, 2003 ; Seaman *et al.*, 2009) ont été menées avec des techniques minéralogiques modernes. En intégrant les données expérimentales disponibles, elles montrent l'origine primaire par cristallisation magmatique des sphérolites des divers types de rhyolites.

La cristallisation en sphérolites ne peut donc pas se produire par dévitrification à la température ambiante lors du vieillissement de la roche au cours des temps géologiques. Possible à partir du verre, elle nécessiterait un réchauffement de plusieurs centaines de degrés par métamorphisme et/ ou action hydrothermale pour atteindre la température de la transition vitreuse. Dans l'Estérel, l'hypothèse anciennement proposée par Michel-Lévy et Bordet, d'une cristallisation primaire est maintenant confortée par les travaux modernes. Ce thème de recherche est classique dans l'Estérel, où il a été abordé dès la fin du XIXe siècle, car on y trouve associés des types variés de rhyolites et de verres rhyolitiques. Il pourrait fournir la matière à de nouvelles études thématiques étayées par les données expérimentales.

CONCLUSION

Dans l'Estérel, les travaux de Michel-Lévy et de Bordet, on conduit à un premier ensemble de connaissances géologiques que les travaux novateurs de Boucarut ont complété et actualisé. Ses travaux, basés sur une nouvelle cartographie, ont permis de résoudre les principaux problèmes que posaient alors la mise en place des roches volcaniques acides en utilisant des concepts volcanologiques, à l'époque nouveaux. Les principaux apports ont été les suivants :

- la mise en place ignimbritique des grandes masses de rhyolites caractéristiques du massif ;
- la mise en place des rhyolites fluidales sous forme de dômes et dômes-coulées;
- la mise en place sous forme de dépôts de déferlantes basales des tufs stratifiés de l'appareil de Maure-Vieille.

Quarante années se sont écoulées depuis la thèse de Boucarut (1971), durant lesquelles un petit nombre de travaux ont concerné directement le volcanisme acide emblématique de l'Estérel sans remettre en cause ses principales conclusions. Les centres d'intérêt des géologues se sont ensuite déplacés vers les connections avec le volcano-plutonisme corse et l'origine magmatologique des divers types pétrographiques. Depuis les travaux de Boucarut de nombreux progrès ont été enregistrés en volcanologie, grâce à de nombreuses études d'ignimbrites, de dépôts de maar, de dômes vitreux ainsi qu'à des études expérimentales sur la cristallisation des magmas acides et enfin, grâce à la modélisation des explosions et des écoulements pyroclastiques. Ces avancées peuvent susciter maintenant de nouveaux travaux et conduire à une connaissance encore meilleure de la volcanologie de l'Estérel.

Bibliographie

BORDET P. (1951) - Etude géologique et pétrographique de l'Estérel. *Thèse, Paris*, 207 p.

BORDET P. (1966) - L'Estérel et le massif de Tanneron. *Hermann édit*, 114 p.

BORDET P. & 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.*, V, pp. 210-213.

BOUCARUT M. (1964) - Existence de filons ignimbritiques au Sud de la caldera de Maure-Vieille, Estérel oriental (Alpes-Maritimes). *Bull. Soc. géol. Fr.*, VI, pp. 397-401.

BOUCARUT M. (1967) - Mode de mise en place des laves acides de l'Estérel (Var). *Bull. Soc. géol. Fr.*, IX, pp. 657-661.

BOUCARUT M. (1971) - Etude volcanologique et géologique de l'Estérel (Var, France). *Thèse d'Etat, Univ. Nice*, 487 p.

BOUCARUT M. & CREVOLA G. (1972) - Dépôts de «déferlantes basales» (base surge) dans l'Estérel et le Devès (Var et Massif Central français) et gouttes de cendres pisolithiques. *Bull. Soc. géol. Fr.*, XIV, pp. 178-180.

BOYER C. (1972) - Study of a few paleozoic Ignimbrites in the Armorican Massif and in the Central Massif, France. *Bull. Volc.*, 36, pp. 46-82.

CHOUBERT G. (1963) - Essai de mise au point du problème des ignimbrites. *Bull. Volc.*, 25, pp. 123-140.

CREVOLA G. (1970) - Etude géologique et paléovolcanologique de la région du Marsaou et des Collets Redons, Estérel oriental (Var). *DES Sciences Naturelles, Univ. Nice*, 88 p.

FISCHER R.V. & WATERS A.C. (1970) - Base surge forms in maar volcanoes. *Am. J. Sci.*, 268, pp. 157-180.

GEZE B. (1957) - Réflexions sur les ignimbrites et les laves acides. *C. R. Som. S. G. F.*, pp. 348-351.

GIMENO D. (2003) - Devitrification of natural rhyolitic obsidian glasses : petrographic and microstructural study (SEM+EDS) of recent (Lipari island) and ancient (Sarrabus, SE Sardinia) samples. *J. non-Cryst. Sol.*, 323, pp. 84-90.

GONDOLO A. (1989) - Le volcanisme alcalin permo-triasique du Sud-Est

de la France : Scandola et Senino (Corse), Estérel et Bas Argens (Provence).
Thèse de 3ème cycle, Univ. Nice, 269 p. et annexes.

LACROIX A. (1930) - Remarques sur les matériaux de projection des volcans et sur la genèse des roches pyroclastiques qu'ils constituent. *In* Livre jubilaire *Soc. géol. Fr*, T II, pp. 431-472.

LOFGREN G. (1971) - Experimentally Produced Devitrification Texture in Natural Rhyolitic Glass. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 82, pp. 111-124.

LOFGREN G. (1971) - Spherulitic Textures in Glassy and Crystalline Rocks. *J. Geophys. Res.*, 76, 23, pp. 5635-5648.

MANLEY C. & FINK J. (1987) - Internal textures of rhyolite flows as revealed by research drilling. *Geology*, 15, pp. 549-552.

MARI G. (1989) - Les lithophyses du Massif de l'Estérel. *Serre édit.*, 87 p.

MICHEL-LEVY A. (1912) - L'Estérel. Etude stratigraphique, pétrographique et tectonique. *Bull. Serv. Carte. géol. Fr*, T 21, pp. 263-321.

MONTEIRO M. (1814) - Du Pyroméride globaire, ou de la roche connue sous le nom de Porphyre globuleux de Corse. *Journal des Mines*, 209, pp. 347-360.

MOORE J.G. (1967) - Base surge in recent volcanic eruptions. *Bull. Volc.*, 30, pp. 337-363.

POITRASSON F. & PIN C. (1998) - Extreme Nd isotopic homogeneity in a large rhyolite province. *Bull. Volc.*, 60, pp. 213-223.

POTIER A. (1877) - Carte géologique détaillée, feuille Antibes à 1/80 000.

RUTTEN M.G. (1959) - Ignimbrites permienes de l'Estérel. *C. R. Som. S. G. F.*, pp. 168-169.

RUTTEN M.G. (1963) - Acid lavas flow structures (as compared to ignimbrites). *Bull. Volc.*, 25, pp. 111-112.

SEAMAN S.J., DYAR D. & MARINKOVIC N. (2009) - The effects of heterogeneity in magma water concentration on the development of flow banding and spherulites in rhyolitic lava. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 183, pp. 157-169.

SMITH R.L. (1960) - Ash flows. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 71, pp. 795-842.

SMITH R.K., TREMALLO R.L. & LOFGREN G. (2001) - Growth of mégaspherulites in a rhyolitic vitrophyre. *Am. Min.*, 86, pp. 589- 600.

SWANSON S.E., NANAY M., WESTRICH H.R. & EICHELBERGER J.C. (1989) - Crystallisation history of Obsidian Dome, Inyo Domes, California, *Bull. Volc.*, 51, pp. 161-176.

TOUTIN-MORIN N., BONIJOLY D., BROCARD C., BROUTIN J., CREVOLA G., DARDEAU G., DUBAR M., FERAUD J., GIRAUD J.D., GODEFROY P., LAVILLE P. & MEINESZ A. (1994) - Carte géol. France (1/50 000), feuille de Fréjus-Cannes (1024). Orléans : BRGM. *Notice explicative* par N. Toutin-Morin *et al.* (1994), 187 p.

VELLUTINI P. (1977) - Le magmatisme permien de la Corse du Nord-Ouest, son extension en Méditerranée occidentale. *Thèse d'Etat, Marseille*. 317 p.

VELLUTINI P., VINCENT P.M., BOUCARUT M., BRISSET F., BRUNETON P. & COCHEME J.J. (1976) - Découverte d'une structure en «cauldron» dans le massif volcanique de l'Estérel. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, série D, pp. 33- 36.

WALLERANT F. (1889) - Etude géologique détaillée de la région des Maures et de l'Estérel. *Thèse, Paris*, 212 p.

WATKINS J., MANGA M., HUBER C. & MARTIN M. (2009) - Diffusion-controlled spherulites growth in obsidian inferred from H₂O concentration profiles. *Contr. Mineral. Petrol.*, 157, pp. 163-172.

WESTPHAL M., ORSINI J., & VELLUTINI P. (1976) - Le microcontinent corso-sarde, sa position initiale : données paléomagnétiques et raccords géologiques. *Tectonophysics*, 30, pp. 141-157.

www.geology.sdsu.edu/how_volcanoes_work/Hydrovolcanic.html