

La phase explosive précédant l'extrusion des dômes volcaniques : exemple du dôme rhyodacitique de Dikkartin Dag, Erciyes, Anatolie centrale, Turquie

Erdal Sen^a, Erkan Aydar^{a,*}, Alain Gourgau^b, Biltan Kurkcuoglu^a

^a Département de géologie, université Hacettepe, 06532 Beytepe, Ankara, Turquie

^b Laboratoire « Magmas et volcans », OPGC, université Blaise-Pascal, CNRS, 5, rue Kessler, 63038 Clermont-Ferrand cedex, France

Reçu le 18 octobre 2000 ; accepté le 25 septembre 2001

Présenté par Paul Tapponnier

Abstract – Initial explosive phases during extrusion of volcanic lava domes: example from rhyodacitic dome of Dikkartin Dag, Erciyes stratovolcano, Central Anatolia, Turkey. The Erciyes stratovolcano, in Central Anatolia, exhibits rhyodacitic domes on its flanks that emplaced after important eruptive pyroclastic events. The changes in eruption dynamics are well defined. Measurements of density and porosity of pumices have been carried out. Initial gas content of erupted magma decreased during the first Plinian phase (units 1 to 3) and then the gas content progressively increased in U4 and in pumiceous ash flow. The latter two deposits contain bread crust bombs that become very abundant in following phreatomagmatic products. The Last Plinian phase, rich in vitreous fragments, where porosity is minimum while density is maximal, preceded the dome extrusion. Although mineralogical and chemical compositions, further thermodynamical conditions of erupted magmas did not change during the eruptive sequence, the eruption mode changed. These changes in eruption mode are the results of the degassing of magma and the meteoric water contribution to the eruption. The transition observed is as follows: Plinian, pyroclastic flow, phreatomagmatism, Plinian and extrusion. To cite this article: E. Sen et al., C. R. Geoscience 334 (2002) 27–33. © 2002 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

Turkey / Anatolia / Erciyes / dome / rhyodacite / Plinian / pyroclastic flow / phreatomagmatic / volatile

Résumé – Le strato-volcan Erciyes, en Anatolie centrale, présente des dômes rhyodacitiques sur ses flancs. Ces dômes se sont mis en place à la suite d'une activité explosive importante, à dynamismes variés. Des mesures de paramètres physiques, densité et porosité, sur l'ensemble de la séquence initiale explosive ont été réalisées sur des ponces. L'évolution dans le temps de ces paramètres montre que la teneur en gaz initiale a d'abord diminué au cours de la première phase plinienne (unités de retombées 1 à 3), puis a augmenté à partir de l'unité 4 d'écoulement cendro-ponceux. Le passage à la phase suivante, phréatomagmatique, se traduit par la présence, dans les dépôts, de bombes en croûte de pain et par une diminution de la porosité. Les dépôts de la dernière phase plinienne (unité de retombée 5) sont très riches en fragments vitreux, la porosité est minimum, la densité globale maximum, avant la mise en place du dôme. Bien que les compositions minéralogiques et chimiques ainsi que les conditions thermodynamiques soient similaires, le style éruptif montre des changements durant la séquence éruptive. Ces changements de régime éruptif sont liés, d'abord au processus de dégazage du magma juvénile, ensuite à l'infiltration d'eau dans le conduit. La transition observée est la suivante : Plinien, écoulement pyroclastique cendro-ponceux, phréatomagmatisme, Plinien, extrusion. Pour citer cet article : E. Sen et al., C. R. Geoscience 334 (2002) 27–33. © 2002 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

Turquie / Anatolie / Erciyes / dôme / rhyodacite / Plinien / phréatomagmatisme / volatils

* Correspondance et tirés à part.

Adresse e-mail : eaydar@hacettepe.edu.tr (E. Aydar).

Abridged version

1. Introduction

The emplacement of lava domes exhibits the changes of eruptive dynamics due to the loss of initial gases [2, 12, 15]. Models in the literature emphasise the important role of the volatile loss during eruption [3, 5, 6, 10]. Plinian air-fall products are sometimes deposited prior to the dome emplacement, as a result of high initial volatile content of magma, which decreases progressively [3, 5]. The eruptive sequence, from explosive to extrusive, related to dome emplacement, occurs on the flanks of Mt. Erciyes stratovolcano, in Central Anatolia, Turkey. The Mt. Erciyes stratovolcano exhibits two evolutionary stages: Koc Dag and New Erciyes. The rhyodacitic domes investigated for this paper, extruded 0.14 ± 0.02 to 0.11 ± 0.03 Ma ago [4]. They exposed on the southern and the northern flanks of the volcano. Dikkartin Dag–69.1 % SiO₂, Karagullu tepe–70.1 % SiO₂ and Perikartin tepe–70.5 % SiO₂ domes extruded on the caldera boundary fault of Koc Dag (*figure 1*).

2. Volcanological evolution: from explosive to extrusive phases

The three rhyodacitic domes are vitreous (obsidian) and exhibit similar eruptive sequences with an important Plinian phase, phreatomagmatism and finally dome emplacement. We hereby summarised the volcanic evolution of Dikkartin Dag dome (*figure 2*).

2.1. First Plinian phase

There are four pumiceous units (U1 to U4). The deposits are normally graded, except U3, which is reversely graded. U3 exhibits large pumice and lithic fragments. Although all air-fall units outcrop in the southern and eastern parts, only U4 extends toward northeast. The isopach and isopleth sketching of U4 shows that its source area is below Dikkartin Dag (*figure 3*). The pumices are pink, white and fibrous, while the lithics are obsidian fragments and oxidised andesites and dacites. Bread crust bombs occur in U4.

2.2. Pumiceous ash flow (ECP)

It outcrops in south and east of the dome. The pumice deposit of ECP is pink and exhibits reverse grading. Pumices are fibrous and rich in amphibole. Some bread crust bombs occur in the basal part of the flow.

2.3. Phreatomagmatic phase (DB)

It is related to the opening of an explosion crater. Products outcrop around the dome. The observed thickness reaches 3 m. Surge deposits are interbedded with air-fall deposits (*figure 2*) and exhibit antidune features and bomb sags.

2.4. Second Plinian phase (U5)

It outcrops in the north and northeastern part of the lava dome. The obsidian fragment content reaches 25 %. Bread

crust bomb content increases toward the top, while pumices are normally graded.

2.5. Dome extrusion

Rhyodacitic dome of Dikkartin Dag represents occasionally banded obsidiannic facies. It buries the previous explosion crater and reaches to 2760 m from its base, situated at 2350 m. The extruded lava flowed down about 5 km toward the south. The lava dome-flow represents blocky surface due to its high viscosity. This dome-flow covers an area of 11.7 km² and corresponds to 0.82 km³ of erupted magma.

3. Density and porosity changes

We carried out density and porosity measures on pumices of the eruptive sequence. The specific weights were measured on crushed pumice powders. The results are listed in the *table*. The porosity and the density variations versus the eruption sequence are shown in *figure 4*. The vesicularity rate exhibits a progressive decrease between U1 and U3. However, porosity drastically increases between U4 and ECP and then decreases in DB and U5. Some bread crust bombs occur when porosity increases. The pumice density exhibits a reverse correlation with the porosity. The density increases between U1 and U3 and decreases in ECP, and then pumices progressively become denser in U5.

4. Physical and chemical conditions

Microprobe analyses of minerals and glass of the explosive and extrusive deposits have been carried out.

All deposits, explosive and extrusive, exhibit similar mineralogical composition: plagioclases (An_{40–82} in pumices, An_{39–83} in lava dome sample), orthopyroxene (En_{60–66} in pumices, En_{59–66} in lava dome), amphiboles (tchermakitic hornblende and magnesio-hornblende in pumices and in lava dome), glass (74–75 % SiO₂ in pumices, 76–77 % SiO₂ in lava dome). The water content of the glass of pumices and dome samples is also similar and ranges between 0.85 and 3.8 % (0.85–3.8 % for pumices, 1.2–3.1 % for dome samples).

The crystallisation pressures and temperatures of selected amphibole microliths have been estimated using geobarometer [7, 9] and geothermometer [8]. The results are close to 3.1 kbar and 761 °C for pumices and 2.8 kbar and 714 °C for dome lava.

5. Conclusion

Lava dome extrusions are sometimes preceded by explosive phases related to important changes in eruptive dynamics. Such variations are controlled by the loss of the initial gas content during eruption [3, 5, 6, 10] as for U1 to U3 evolution. The reverse grading of the pumice deposit, lithic enrichment and grain size increasing in U3, and the progressive decrease of the porosity from U1 to U3 suggest a quiescence period before a new gas enrichment. However,

the magma progressively degassed during U1–U3 period, activity becomes more and more explosive (U4 and ECP) with occurrence of bread crust bombs, before the DB deposit.

The microprobe study of minerals and glasses of explosive and extrusive products suggests that no major changes of magma composition occurred during the erup-

tive sequence. We suggest that the eruptive style was controlled by degassing and water contribution to eruption.

So, the changes in eruption style during the emplacement of Dikkartin Dag dome were as follows: Plinian pumice fall, ash-and-pumice pyroclastic flow, phreatomagmatism, Last Plinian event and final extrusion.

1. Introduction

Les dômes volcaniques caractérisent une activité extrusive, à lave de forte viscosité. Mais la croissance d'un dôme passe par différents stades, dans lesquels les styles éruptifs sont aussi fortement explosifs [1, 14], surtout dans les phases initiales [2, 11, 12, 15]. Les modèles décrits dans la littérature impliquent des teneurs initiales élevées en éléments volatils, puis une diminution de ces teneurs [3, 5, 6, 10].

La succession de plusieurs phases explosives précédant l'extrusion d'un dôme à magma différencié a fait l'objet d'investigations détaillées sur les flancs du strato-volcan Erciyes, en Anatolie centrale. Ce strato-volcan présente deux stades d'édification : le Koc Dag et le cône terminal de l'Erciyes [13]. Des dômes rhyodacitiques sont mis en place tardivement dans l'histoire du volcan, entre 0,14 ($\pm 0,02$) et 0,11 ($\pm 0,03$) Ma [4]. Ils sont présents sur les flancs sud et nord du volcan. Ces dômes, Dikkartin Dag, Karagullu tepe et Perikartin tepe sont localisés en bordure de la caldéra de Koc Dag (*figure 1*).

2. Évolution volcanologique

2.1. Les phases initiales explosives

Nous avons étudié plus particulièrement les trois dômes rhyodacitiques (69 à 71 % de SiO₂) à faciès vitreux obsidiennique, qui présentent une évolution identique, de la phase plinienne initiale à l'extrusion du dôme proprement dit. Nous présentons ici l'évolution des phases initiales explosives du dôme de Dikkartin Dag (*figure 2*).

2.1.1. La première phase plinienne

Les produits correspondants sont groupés en quatre unités de retombées ponceuses (U1 à U4). Les dépôts ponceux présentent un granoclassement normal, à l'exception de l'unité 3, où il est inverse. Cette unité U3 présente une granulométrie relativement grossière des ponces (diamètre moyen mesuré à 4,6 km de la source, sur les cinq fragments les plus gros : 31 cm) et des éléments lithiques (diamètre moyen mesuré dans les mêmes conditions : 16 cm), avec une augmentation de la quantité de matériel lithique, de la base

au sommet. Ces unités ne sont identifiées que sur les flancs sud et est. Toutefois, U4 montre une extension aussi vers le nord-est. Les courbes isopaques et isoplètes de U4 sont illustrées sur la *figure 3*. Les constituants de cette retombée sont grossiers. La moyenne de cinq mesures sur les fragments les plus grossiers, près du point de sortie (1,5 km, *figure 3*) est de 58 cm pour les ponces et de 65 cm pour les lithiques. Notre méthode de mesure met en évidence une baisse importante de la granulométrie à 10 km de distance : 8 cm de diamètre pour les ponces, 5 cm pour les lithiques. Les ponces sont roses, blanches et fibreuses. Les éléments lithiques sont des fragments andésitiques et dacitiques oxydés. Des bombes en croûte de pain sont présentes dans les produits de U4. La disposition des courbes isopaques et isoplètes suggère que la source était située sous le dôme.

2.1.2. L'écoulement des cendres et ponces (ECP)

Cet écoulement pyroclastique cendro-ponceux affleure au sud et à l'est du dôme. Les ponces fibreuses sont de couleur rose et riches en amphibole. À 2,5 km du point de sortie, on observe un granoclassement inverse des ponces, qui peuvent atteindre 95 cm de diamètre au sommet de l'écoulement. Le granoclassement est normal pour les lithiques (20 cm de diamètre à la base de l'écoulement). Quelques bombes en croûte de pain ont été observées dans la partie basale de l'écoulement.

2.1.3. La phase phréatomagmatique (DB)

Elle est à l'origine de l'ouverture d'un cratère d'explosion situé en bordure de la caldéra. Ce cratère est occupé par le dôme terminal. Ses produits affleurent autour du dôme (*figure 3*), avec un maximum d'extension de 6 km et une épaisseur pouvant atteindre 3 m à 1,7 km de la source. Ces dépôts sont interstratifiés avec ceux des retombées pliniennes ponceuses (*figure 4*). Ils présentent des figures sédimentologiques du type antidune et des figures d'impact sous des bombes en croûte de pain à écorce vitreuse.

2.1.4. La deuxième phase plinienne (U5)

Les produits de l'unité 5 (U5) sont situés au nord et nord-est du dôme. La concentration en fragments d'obsidienne atteint 25 %. Les bombes en croûte de

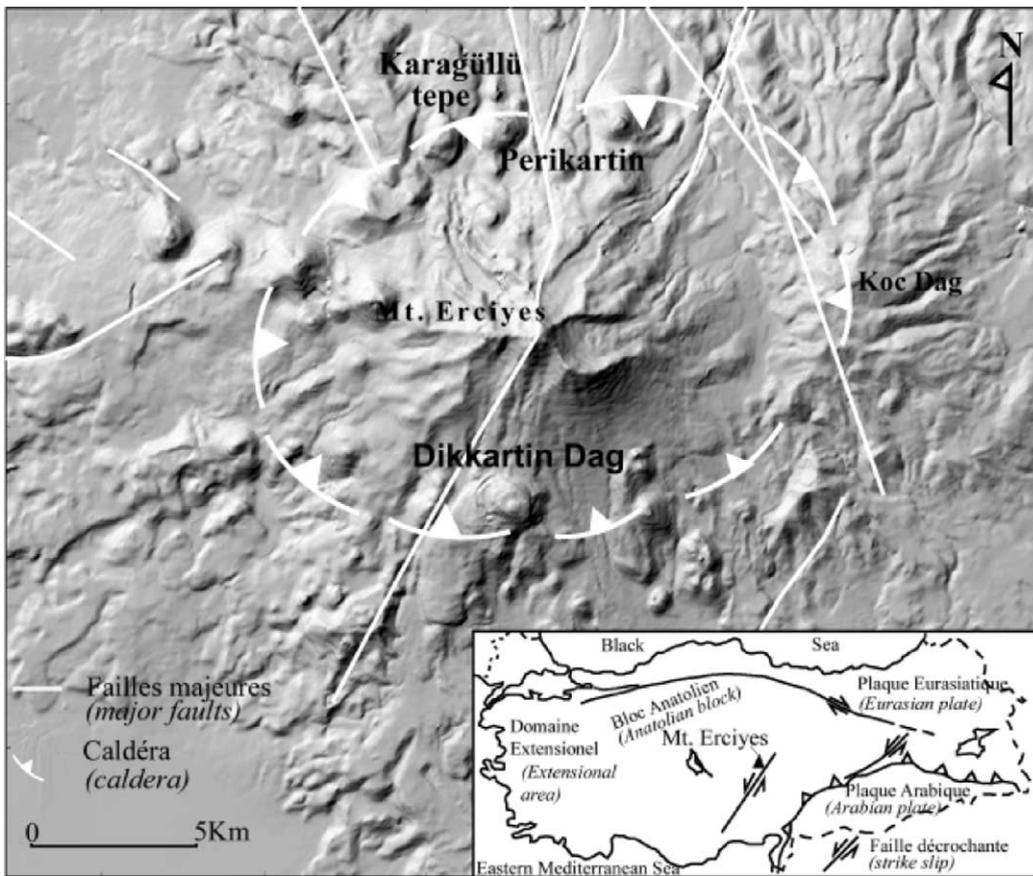


Figure 1. Modèle numérique de terrain du mont Erciyes et localisation des dômes rhyodacitiques. L'encart montre la localisation géographique du volcan dans son contexte géodynamique.

Figure 1. Digital elevation model of Mt. Erciyes and areal distribution of rhyodacitic domes. Small sketching map shows the place of volcano according to geodynamical context.

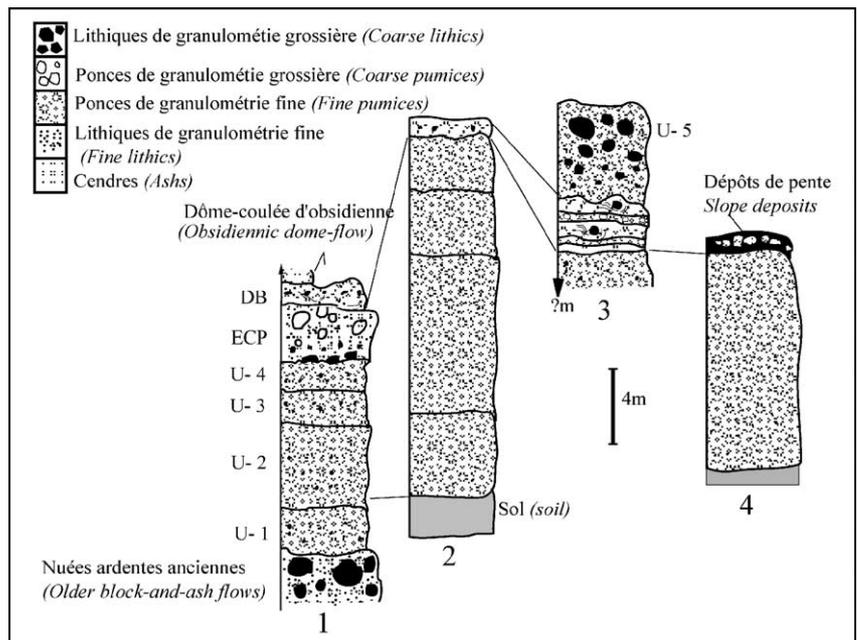
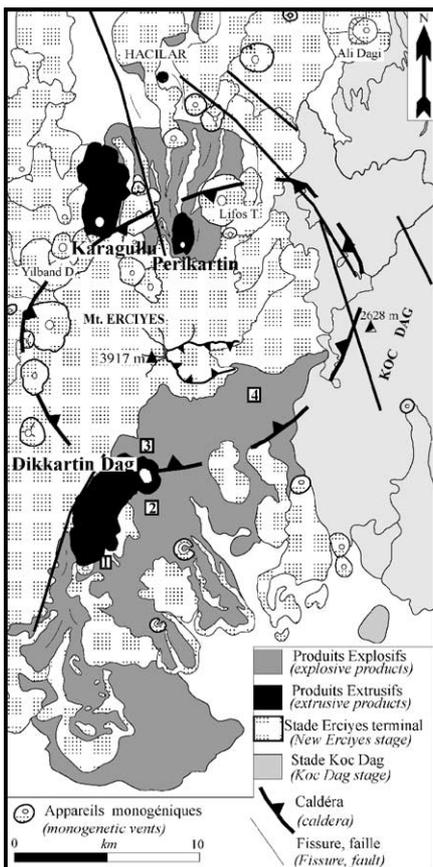


Figure 2. Carte géologique simplifiée du volcan d'après Sen [13] et coupes synthétiques dans les produits explosifs et extrusifs.

Figure 2. Simplified geological sketching map of volcano after Sen [13] and stratigraphic correlations of the explosives and extrusives products.

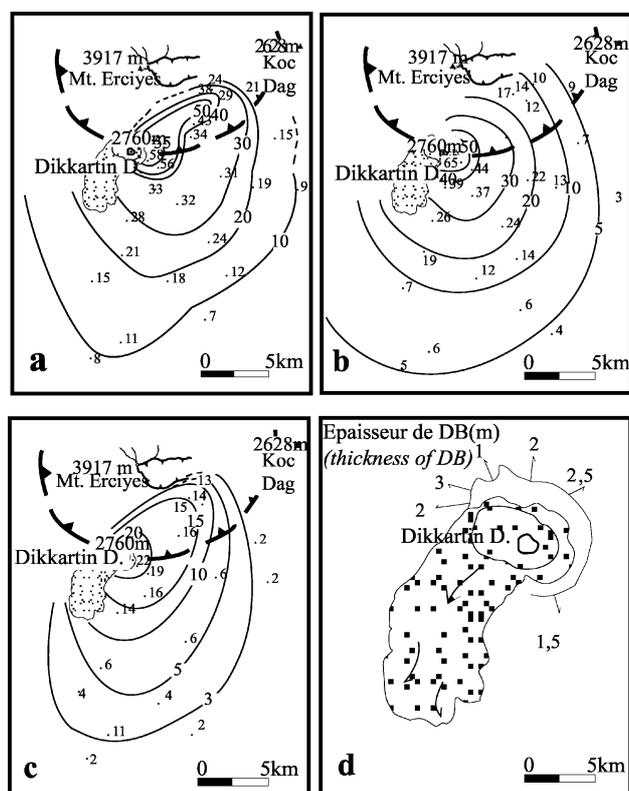


Figure 3. Cartes avec courbes isopaques et isoplètes des produits explosifs associés à la croissance du dôme de Dikkartin Dag. **a.** Moyenne de cinq mesures en centimètres pour les ponces de U4. **b.** Moyenne de cinq mesures en centimètres pour les lithiques de U4. **c.** Épaisseur de U4 en mètres. **d.** Épaisseur de DB en mètres.

Figure 3. Isopach and isopleth sketching of explosive products. **a.** Average of five maximum pumice fragments of U4 in centimetres. **b.** Average of five maximum lithic fragments of U4 in centimetres. **c.** Thickness sketching of U4 in metres. **d.** Thickness sketching of DB in metres.

pain sont plus abondantes vers le sommet, tandis que les ponces montrent un granoclassement normal. Les éléments lithiques sont parfois très grossiers (60 cm de diamètre). Ces produits n'affleurent que dans la partie proximale du dôme, avec une extension de quelques centaines de mètres. Cette unité plinienne particulière, à magma juvénile dominant, peu ou pas vésiculé (obsidienne), est suivie par l'extrusion du dôme.

2.2. Extrusion du dôme

Le dôme rhyodacitique de Dikkartin Dag est à faciès vitreux obsidiennique, parfois rubéfié. Il s'agit, en fait, d'un dôme-coulée, qui a rempli partiellement le cratère d'explosion et s'est écoulé, sous forme de lave à blocs, jusqu'à 5 km vers le sud (figure 4). Cet épisode extrusif et effusif a couvert une superficie de 11,7 km², qui correspond à 0,82 km³ de magma émis.

3. Mesures de la densité et de la vésiculation des ponces

3.1. Méthodologie

Une série de mesures de densité et de porosité a été réalisée sur les ponces de chaque phase éruptive (trois échantillons de chaque unité). Les ponces sélectionnées ont été lavées à l'eau distillée, séchées à l'étuve pendant 24 h et pesées. Nous avons utilisé une résine, connaissant son poids et son volume, pour boucher les vésicules de surface des ponces. Les mesures de volume des ponces ont été effectuées dans du mercure. Les ponces sélectionnées ont ensuite été broyées et pesées. Les volumes ont été mesurés avec un picnomètre, ce qui a permis de calculer le poids spécifique et la porosité des ponces.

3.2. Interprétation

Les variations de la porosité et du volume des pores (tableau et figure 5) montrent une diminution d'abord progressive entre U1 et U3 et ensuite une augmentation vers ECP, accompagnée par l'apparition de bombes en croûte de pain. Quant à la variation de densité des ponces, elle montre une corrélation inverse avec la porosité. Elle augmente progressivement entre U1 et U3. Cette augmentation est liée à la diminution des pores, conséquence attendue du processus de dégazage progressif. Les produits les plus poreux et aussi les moins denses de la séquence sont ceux de l'écoulement ponceux. La porosité baisse encore en fin de séquence, avec le passage aux produits phréatomagmatiques et à U5. En parallèle, l'évolution de la densité montre une nette augmentation avec le passage au phréatomagmatisme.

4. Conditions physico-chimiques du dégazage

Les analyses des produits explosifs et extrusifs à la microsonde électronique ont permis d'évaluer les conditions thermodynamiques de cristallisation des assemblages minéralogiques.

Les produits explosifs et extrusifs présentent des paragenèses minérales similaires, avec plagioclase (An40–82 pour les ponces, An39–83 pour l'obsidienne du dôme), orthopyroxène (En60–66 pour les ponces, En59–66 pour le dôme), amphiboles (hornblende tchermakitique, magnésio-hornblende pour les ponces et pour le dôme). Les verres sont aussi semblables (74–75 % SiO₂ pour les ponces, 76–77 % SiO₂ pour l'obsidienne du dôme). La teneur en eau des verres (en inclusions) des ponces et de l'obsidienne du dôme est aussi identique et varie entre 0,85 et 3,8 % (0,85–3,8 % pour les ponces, 1,2–3,1 % pour le

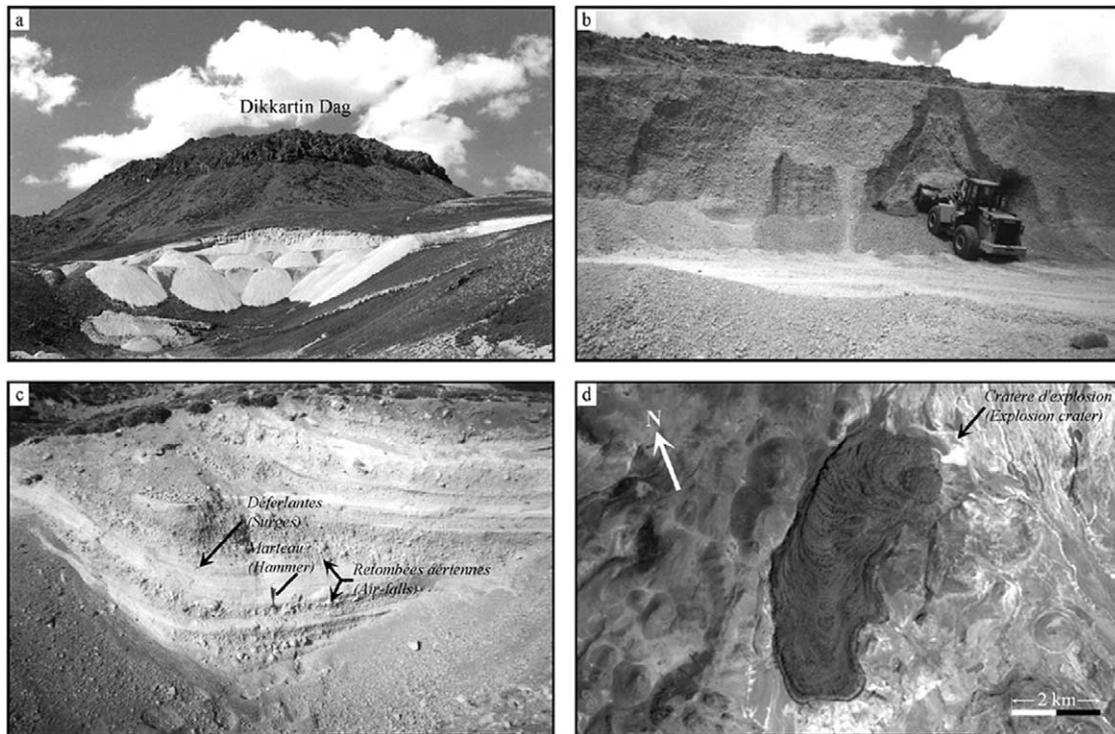


Figure 4. Illustrations de terrain. **a.** Dôme de Dikkartin Dag. En premier plan, carrière de ponces ouverte dans l’anneau de tufs. **b.** Carrière dans les retombées ponceuses (6 km de la source). **c.** Produits phréatopliniens. **d.** Image Spot du dôme-coulée de Dikkartin Dag.

Figure 4. Field observations. **a.** Dome of Dikkartin Dag. Pumice quarry within the tuff-ring deposits. **b.** Pumice quarry within the pumiceous air-fall deposits (6 km from the source area). **c.** Outcrop of Phreatoplinian deposits. **d.** SPOT image of Dikkartin Dag.

Tableau. Paramètres physiques mesurés : densités des ponces, des poudres, et porosité des produits explosifs initiaux.

Table. Density and porosity measurement results of explosive products.

Échantillons (dans l’ordre stratigraphique)	Densité	Poids spécifique ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Porosité (%)
Plinien, unité 1	0,75	2,25	66
Plinien, unité 2	0,79	2,26	65
Plinien, unité 3	0,88	2,22	61
Plinien, unité 4	0,75	2,23	66
Écoulement cendro-ponceux	0,69	2,24	69
Déferlante basale	0,85	2,26	63
Plinien, unité 5	1,02	2,27	55

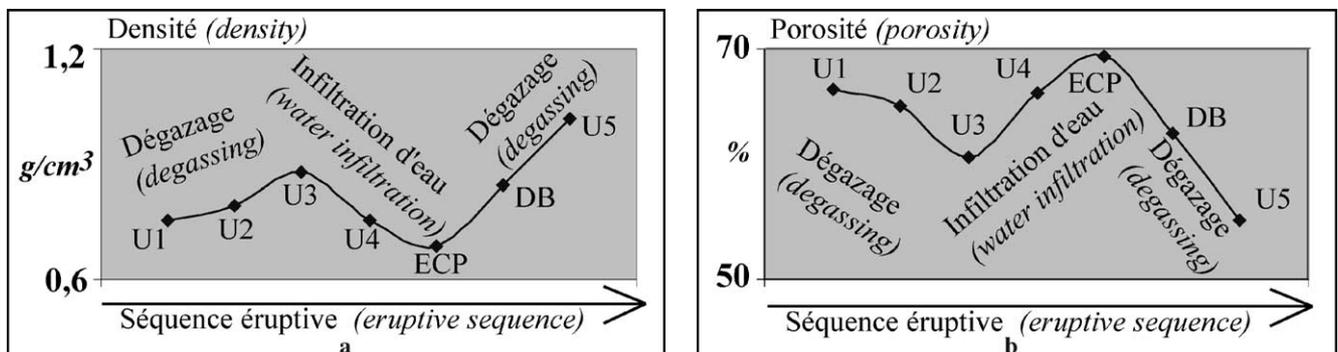


Figure 5. Évolution de la densité (a) et de la porosité (b) des produits explosifs initiaux du dôme de Dikkartin Dag.

Figure 5. Evolution of density and porosity during eruptive sequence.

dôme). Ces valeurs indiquent la concentration originale des volatils dans le magma avant l'éruption [11].

Les calculs de températures et pressions ont été effectués sur des microlites d'amphiboles des ponces et du dôme [7–9]. Nous avons obtenu une pression moyenne de 3,1 kbar et une température de 761 °C pour les ponces et de 2,8 kbar et 714 °C pour le dôme.

5. Conclusion

La mise en place d'un dôme volcanique peut présenter des variations de dynamisme éruptif importantes [1, 14]. Ce type de changement est sous contrôle de la teneur en éléments volatils du magma, qui baisse avec l'évolution observée [3, 5, 6, 10].

Bien que le magma ait perdu à peu près 6 % de ses volatils entre U1 et U3 (*tableau*), les ponces des retombées U4 et de l'écoulement cendro-ponceux ont des taux de porosité élevés ; ces produits s'accompagnent aussi de bombes en croûte de pain. On note, dans U3, un granoclassement inverse et un enrichissement en lithique, dû à l'élargissement probable

du conduit. La porosité baisse encore en fin de séquence, avec le passage aux produits phréatomagmatiques et à U5. L'alternance observée de dépôts de déferlantes et de retombées pliniennes évoque un mécanisme du type phréatoplinien. La dernière phase de retombées pliniennes (U5) est très riche en fragments grossiers d'obsidienne et présente les ponces les moins vésiculées de la séquence, juste avant la mise en place du dôme localisé en bordure de la caldeira.

L'étude minéralogique et thermodynamique des produits explosifs et extrusifs nous montre que le magma juvénile rhyodacitique ne change pas au cours de ce cycle éruptif et que les conditions physico-chimiques du magma restent stables. Nous soulignons le rôle important du dégazage sur le dynamisme éruptif. De plus, l'eau météorique infiltrée affecte le style de l'éruption avec le passage à un dynamisme phréatomagmatique (DB). Une dernière phase de dégazage (U5) permet un retour au type plinien, avant la phase extrusive terminale. Le volume total de magma émis est estimé à 1,94 km³ (soit 1,12 km³ pour les pyroclastites et 0,82 km³ pour le dôme-coulée).

Remerciements. Cette étude a été financée par Tubitak (Conseil de la recherche scientifique et technique de Turquie), projet YDABCAG-87.

Références

[1] Boudon G., Bourdier J.-L., Traineau H., High-energy pyroclastic flows in the recent activity of Mt. Pelée [abstract], Martinique, IAVCEI congress, Ankara, 1994.

[2] Cas R.A.F., Wright J.V., Volcanic Successions, Chapman and Hall, London, 1988.

[3] Eichelberger J.C., Westrich H.R., Magmatic volatiles in explosive rhyolitic eruptions, *Geophys. Res. Lett.* 8 (1981) 757–760.

[4] Ercan T., Tokel S., Matsuda J.I., Ui T., Notsu K., Fujitani T., Erciyes Dagı (Orta Anadolu), Pliyo-kuvaterner volkanizmasına ilişkin yeni jeokimyasal, izotopik, radyometrik veriler ve jeotermal enerji açısından önemi, Türkiye 6. Enerji Kongresi, teknik oturum tebliği, 1994, pp. 208–222.

[5] Fink J.H., Structure and emplacement of a rhyolitic obsidian flow: Little Glass Mountain, Medicine Lake Highland, northern California, *Geol. Soc. Am. Bull.* 94 (1983) 632–680.

[6] Fink J.H., Anderson S.W., Manley C.R., Textural constraints on effusive silicic volcanism: beyond the permeable foam model, *J. Geophys. Res.* 97 (B6) (1992) 9073–9083.

[7] Hammarstrom J.M., Zen E.A., Aluminium in hornblende: an empirical igneous geobarometer, *Am. Mineral.* 71 (1986) 1297–1313.

[8] Helz R.T., Alkali exchange between hornblende and melt: a temperature-sensitive reaction, *Am. Mineral.* 64 (1979) 953–965.

[9] Hollister L.S., Grissom G.C., Peters E.K., Stowell H.H., Sisson V.B., Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calcalkaline plutons, *Am. Mineral.* 72 (1987) 231–239.

[10] Jaupart C., Allègre C.J., Gas content, eruption rate and instabilities of eruption regime in silicic volcanoes, *Earth Planet. Sci. Lett.* 102 (1991) 413–429.

[11] Martel C., Pichavant M., Bourdier J.-L., Traineau H., Holtz F., Scaillet B., Magma storage conditions and control of eruption regime in silicic volcanoes: experimental evidence from Mt. Pelée, *Earth Planet. Sci. Lett.* 156 (1998) 89–99.

[12] Martel C., Bourdier J.-L., Pichavant M., Traineau H., Textures, water content and degassing of silicic andesites from recent Plinian and dome-forming eruptions at Mount Pelée volcano (Martinique, Lesser Antilles arc), *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 96 (2000) 191–206.

[13] Sen E., Erciyes Stratovulkanı'nın (Orta Anadolu) volkanolojik ve petrolojik gelişiminin incelenmesi, H.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü. Yüksek Mühendislik Tezi, 1997.

[14] Traineau H., Westercamp D., Bardintzeff J.-M., Miskovsky J.-C., The recent pumice eruptions of Mt. Pelée volcano, Martinique. Part I. Depositional sequences, description of pumiceous deposits, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 38 (1989) 17–33.

[15] Villemant B., Boudon G., Komorowski J.C., U-series disequilibrium in arc magmas induced by water-magma interaction, *Earth Planet. Sci. Lett.* 140 (1996) 259–267.