



Géomatériaux (Pétrologie)

Caractérisation des ignimbrites néogènes du bassin d'Arequipa, Pérou

Perrine Paquereau ^{a,*}, Jean-Claude Thouret ^a, Gerhard Wörner ^b, Michel Fornari ^c,
Orlando Macedo ^d, Pierrick Roperch ^e

^a Laboratoire « Magmas et Volcans », UMR 6524, CNRS et OPGC, université Blaise-Pascal–Clermont-2, 5, rue Kessler,
63038 Clermont-Ferrand cedex, France

^b Geowissenschaftliches Zentrum der Universität Göttingen, Abt. Geochemie, Universität Göttingen, 37077 Göttingen, Allemagne
^c Géosciences Azur UMR 6526 CNRS et IRD UR 104, université de Nice–Sophia Antipolis, parc Valrose, 06108 Nice cedex 02, France

^d Instituto Geofísico del Perú, Oficina regional Arequipa, Cayma, Arequipa, Pérou

^e IRD UR 104 et université de Rennes-1, campus de Beaulieu, av. du Général-Leclerc, 35042 Rennes cedex, France

Reçu le 2 juin 2004 ; accepté après révision le 14 décembre 2004

Disponible sur Internet le 22 janvier 2005

Présenté par Jacques Anquielier

Résumé

Quatre unités ignimbritiques sont reconnues dans la région d'Arequipa : (1) celle de « río Chili » à 13,33 Ma ; (2) l'ignimbrite « La Joya », la plus étendue, qui à 4,9 Ma ; (3) l'ignimbrite « aéroport d'Arequipa », qui s'est mise en place vers 1,65 Ma à partir de la zone où s'est édifié le volcan Chachani ; (4) enfin, les « Tufs de Yura », vers 1,02 Ma, qui affleurent à l'ouest du Chachani. Il s'agit de rhyolites calco-alkalines à plagioclase, biotite, quartz, sanidine et opaques. La présence d'amphibole caractérise les ignimbrites de río Chili et La Joya. Les éléments en traces indiquent une contamination crustale plus forte pour les ignimbrites anciennes. **Pour citer cet article : P. Paquereau et al., C. R. Geoscience 337 (2005).**

© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Characteristics of the Neogene ignimbrites in the Arequipa area. Four ignimbritic units have filled the Arequipa Basin and outcrop around the Chachani Volcano. (1) The oldest Río Chili ignimbrite is 13.33 Ma old; (2) the most widespread La Joya ignimbrite is 4.9 Ma old; (3) the Arequipa Airport ignimbrite (1.65 Ma) flowed from an area buried beneath Chachani; (4) the Yura Tuffs, 1.02 Ma old, are restricted to the west of Chachani. All are calc-alkaline rhyolites with plagioclase, biotite, quartz, sanidine, and opaques, but the Río Chili and La Joya ignimbrites also contain amphibole. Trace elements of the older ignimbrites reflect stronger crustal influence. **To cite this article: P. Paquereau et al., C. R. Geoscience 337 (2005).**

© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : p.paquereau@opgc.univ-bpclermont.fr (P. Paquereau).

Mots-clés : Ignimbrite ; Pérou ; Stratigraphie ; Datations ^{40}Ar – ^{39}Ar ; Rhyolite ; Éléments en traces

Keywords : Ignimbrite; Peru; Stratigraphy; ^{40}Ar – ^{39}Ar ages; Rhyolite; Trace elements; REE

Abridged English version

Our study focuses on the correlation of four rhyolitic ignimbrites located in and around the Arequipa Basin (Fig. 1), previously described as a unique ignimbrite sheet [2,4,12]: (1) the Río Chili ignimbrite (ca. 13.33 Ma), of unknown geometry, appears in the Río Chili canyon only (Fig. 1) and consists of a cooling unit of non- to partially-welded massive crystal-rich lapilli tuffs (Table 1). This ignimbrite represents the base of the Neogene ignimbrite succession in the Arequipa area (Fig. 2). (2) The voluminous ($\sim 20 \text{ km}^3$) and widespread La Joya ignimbrite sheet (ca. 4.87 Ma), which probably has its source area buried beneath the Chachani complex, has filled in the Arequipa depression (Figs. 1 and 2). This ignimbrite covers the Arequipa Batholith toward the Río Vitor piedmont and also part of the Altiplano. In the Río Chili canyon, the La Joya ignimbrite is composed of three welded massive lapilli tuffs (Table 1). (3) The Arequipa Airport ignimbrite sheet (ca. 1.6 Ma, $\sim 18 \text{ km}^3$), the third and latest infill of the Arequipa Basin (Figs. 1 and 2), consists of a lower white, columnar jointed, massive lapilli tuff, indurated by vapour-phase recrystallisation, overlain by an upper pink, lithic-rich, non-welded massive lapilli tuff (Table 1). The source of this ignimbrite is located beneath the Chachani complex, as indicated by AMS and component data. (4) The Yura non-welded pumice-flow deposits (ca. 1.02 Ma, 1.5 km^3) are restricted to the northern and western flanks of Chachani complex and may be equivalent to the tuffs and tephra layers of the Capillune Formation on the Altiplano (Fig. 1 and Table 1). All ignimbrites are high-K rhyolites (Table 2) that contain variable amounts of plagioclase, biotite, quartz, sanidine and opaques. The Río Chili and La Joya ignimbrites are distinctive in containing amphibole, with a higher Ti, Al, Fe content for the Río Chili ignimbrite amphibole. Trace elements data reflect a stronger crustal participation for the La Joya and Río Chili ignimbrites than the other ignimbrites (U and Th in Table 2), which can be accounted for by a thicker continental crust during its emplacement. The volumi-

nous ($> 40 \text{ km}^3$) Neogene ignimbrites of the Arequipa area reflect three major magmatic pulses in the Central Volcanic Zone of the Andes, whose genetic relationships with tectonic uplift and crustal thickening is still debated [6,8,12].

1. Introduction

Dans la région d'Arequipa, dans le Sud du Pérou (Andes centrales, Fig. 1) affleure une série d'ignimbrites rhyolitiques [2,4] attribuées au Mio-Pliocène [5]. Ces ignimbrites néogènes couvrent une surface d'au moins 800 km^2 autour du massif volcanique du Chachani, dans le bassin d'Arequipa et sur le piémont de Vitor (Fig. 1). Les estimations volumétriques (Tableau 1) sont fondées sur les épaisseurs mesurées dans les vallées radiales et sur l'interprétation d'un modèle numérique de terrain. Épaisses de 10 à 150 m, les ignimbrites remplissent la dépression tectonique d'Arequipa ($35 \times 20 \text{ km}$), orientée WNW–ESE entre la Cordillère occidentale, au nord, et le batholite d'Arequipa, au sud. Les ignimbrites néogènes sont aussi exposées sur l'altiplano à l'est et au nord-est du complexe volcanique du Chachani. Enfin, des ignimbrites distales ont dépassé le batholite pour s'étaler sur le piémont de la cordillère occidentale à 60 km à l'WSW d'Arequipa.

Leur faible degré de soudure et surtout leur texture souvent dévitrifiée leur ont valu le nom de *sillar* dans la littérature géologique et vernaculaire. En 1996, Barker [1] a préconisé l'abandon de ce terme, car les ignimbrites d'Arequipa se caractérisent par une grande variété de faciès, de textures et degrés de soudure (Tableau 1). Face à cette hétérogénéité, notre objectif était triple : (1) distinguer les nappes ignimbritiques, les séquences de refroidissement (*cooling unit*) et les différentes unités d'écoulement qui les composent ; (2) caractériser ces ignimbrites en combinant la stratigraphie, des datations ^{40}Ar – ^{39}Ar , la sédimentologie, la pétrologie, la minéralogie et la géochimie ; (3) cerner les sources géographiques grâce à des critères géologiques et volcanologiques.

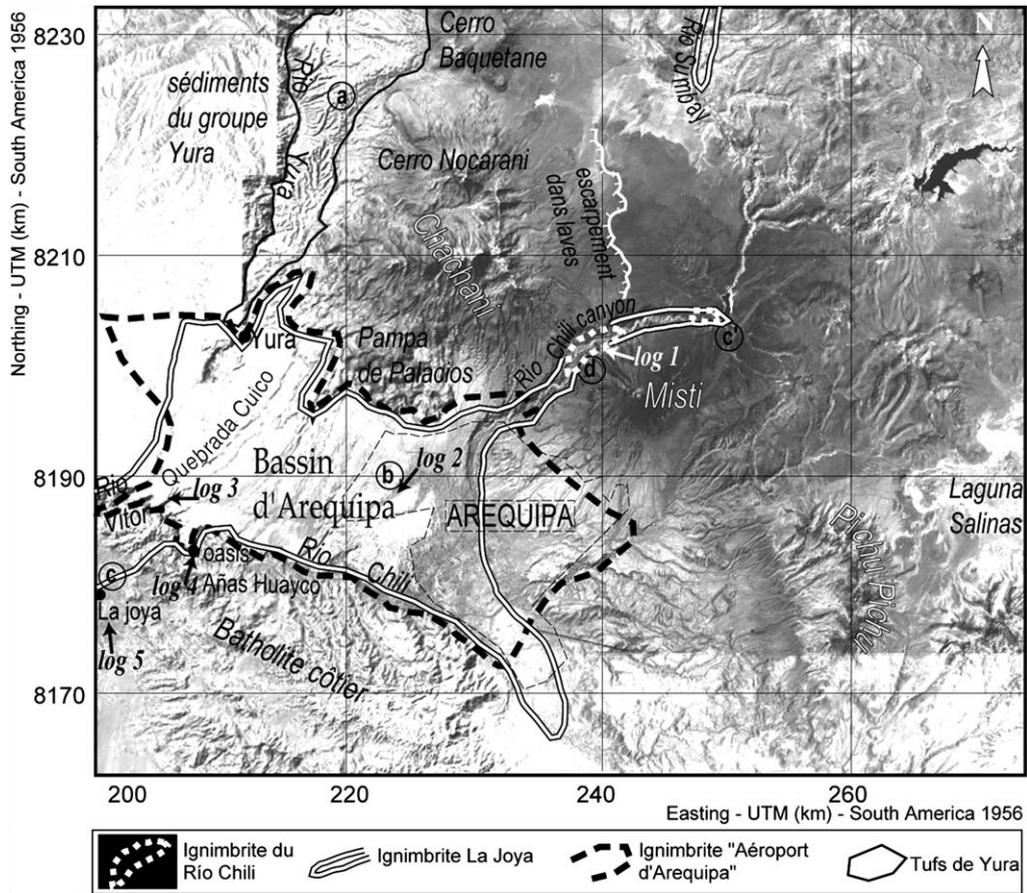


Fig. 1. Surfaces recouvertes par les ignimbrites d'Arequipa et localisation des noms cités dans le texte, des échantillons datés et des sections, sur un MNT drapé par une image Landsat de 1986.

Fig. 1. Areas mantled by the Arequipa ignimbrites and location of sites, dated samples, and sections on a DEM draped with a Landsat image of 1986.

2. Stratigraphie, faciès et datations des ignimbrites d'Arequipa

Nous avons distingué quatre ignimbrites dans la dépression d'Arequipa et autour du massif du Chachani : celles de río Chili, de La Joya, de l'aéroport d'Arequipa et les tufs de Yura (Fig. 2 ; Tableau 1).

2.1. L'ignimbrite de « río Chili »

La plus ancienne ignimbrite, visible dans l'amont du canyon du río Chili (Fig. 1), comprend trois unités d'écoulement, de 90 à 150 m d'épaisseur totale, reposant sur des brèches tertiaires et des quartzites du

Précambrien. Les zones intermédiaires, parfois colonnaires, sont partiellement soudées et dévitrifiées avec des ponces aplaties, tandis que le sommet et la base ne sont pas soudés. L'ignimbrite est riche en ponces porphyriques centimétriques à décimétriques, à vésicules arrondies, contenues dans une matrice cendreuse riche en cristaux. Elle a été datée à 13,33 Ma (Tableau 1 ; [9]). La géométrie de cette ignimbrite miocène est mal connue, mais elle s'étale aussi au nord du Misti entre le groupe Tacaza oligocène et les laves du groupe Barroso d'âge Mio-Pliocène [3]. Elle semble se poursuivre vers le Sud-Est de la vallée du río Chili sous le piémont du Misti, mais elle n'est pas observée vers l'Ouest du bassin.

Tableau 1
Principales caractéristiques des ignimbrites dans le bassin d'Arequipa et autour du massif volcanique du Chachani

Table 1
Main characteristics of ignimbrites in the Arequipa depression and around the Chachani massif

Ignimbrites, nappes ou unités de refroidissement	Géométrie, surface, épaisseur, volume estimé	Lithofaciès et soudure	Lithologie ; cortège minéralogique	Compositions calco-alcaline, rhyolitique, anomalie Eu*	^{40}Ar–^{39}Ar âge en Ma sur la Fig. 1
Tuf de Yura	HAR*, 150 km ² , 10 à 50 m, env. 1,5 km ³	bancs de coulées de ponces et cendres non soudées	Ponces et verres > 80%, cristaux > 15%, lithiques non juvéniles < 5%, Plag > san > qtz > biot > ox	SiO ₂ 75,24% pds, Na ₂ O + K ₂ O 8,5% pds, Eu/Eu* positive, fractionnement LREE	1,02 ± 0,09 (sur biotite) (a)
Aéroport Arequipa, unité supérieure rosée	HAR ~ 600 km ² , 5 à 100 m	coulées de cendres et ponces massives et non soudées	Ponces et verres > 60%, cristaux > 15%, lithiques n.j. < 25% Plag > biot > ox > qtz > san ≫ amph.	SiO ₂ 74,77% pds, Na ₂ O + K ₂ O 8,54% pds, Eu/Eu* négative	1,64 ± 0,07, 1,67 ± 0,07 (sur biotite) (b)
Aéroport Arequipa, unité inférieure blanchâtre	env. 20 km ³	tuf massif à peine soudé, recristallisé, phase vapeur	Ponces et verres > 65%, cristaux > 20%, lithiques n.j. < 15%, Plag > biot > ox > qtz > san	SiO ₂ 74,93% pds, Na ₂ O + K ₂ O 8,71% pds	[2,42 ± 0,11], FT obsidienne, [12]
La Joya	MAR : 6,4 × 10 ⁻⁴ , 800 km ² , 10 à 100 m, 15 à 20 km ³	tuf massif partiellement à densément soudé, dévitrifié	Ponces et verres > 75%, cristaux < 20%, lithiques non juv. < 5%, Plag > san > qtz > biot > ox > amph	SiO ₂ 75,4% pds, Na ₂ O + K ₂ O 8,83% pds, Eu/Eu* très négative, Fort fractionnement LREE	4,88 ± 0,22 (sur sanidine) (c et c')
Río Chili	pas connus, 50 à 150 m	tuf non soudé (sommet et base) à partiellement soudé et dévitrifié	Ponces et verres > 65%, cristaux > 30%, lith. n.j. < 5% Plag > amph > biot > san > qtz > ox	SiO ₂ 72,9% pds Na ₂ O + K ₂ O 9,25% pds Eu/Eu* négative	13,33 ± 0,05 (moyenne 4 âges sur biotite) (d)

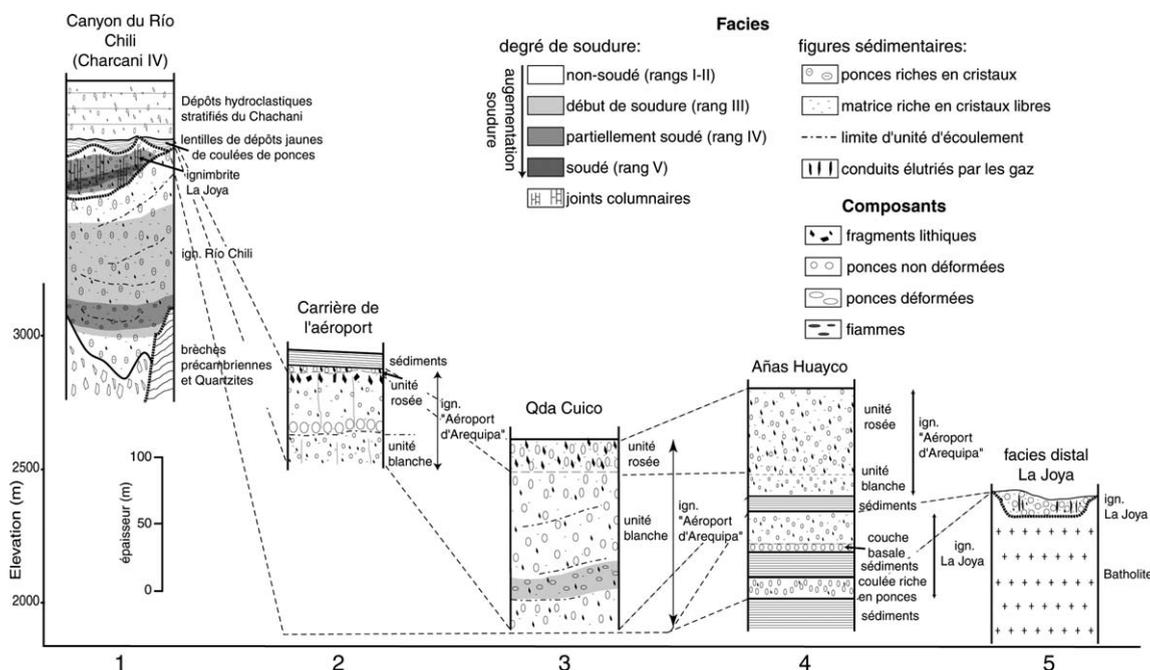


Fig. 2. Logs stratigraphiques synthétiques (situés sur la Fig. 1) montrant la corrélation entre les nappes ignimbritiques néogènes et quaternaires.

Fig. 2. Composite stratigraphic sections (located in Fig. 1) showing correlations between the Neogene and Quaternary ignimbrite sheets.

2.2. La nappe ignimbritique « La Joya »

La nappe La Joya, datée à environ 4,9 Ma (Tableau 1), s'est écoulée dans le bassin d'Arequipa vers le sud, le sud-est et surtout le sud-ouest, où elle a dépassé le batholite d'Arequipa jusqu'à La Joya à 40 km du massif du Chachani, en surmontant un escarpement mesurant aujourd'hui 350 m (Fig. 1). D'après la surface couverte (800 km²) et les épaisseurs mesurées (Fig. 2), le volume de la nappe La Joya est estimé entre 15 et 20 km³ (Tableau 1). Épaisses de 20 m en moyenne, des coulées de cendres et ponces indurées forment une séquence de refroidissement comprenant deux unités d'écoulement totalisant 50 m au milieu et à l'amont du canyon du río Chili. La séquence présente : une semelle cendreuse de 50 cm à 3 m d'épaisseur, un corps partiellement soudé à densément soudé, avec fiammes dévitrifiées, et un sommet peu soudé et dévitrifié. Le corps de l'ignimbrite montre des ponces fibreuses dans une matrice riche en cristaux contenant moins de 5 % de xénolites. La partie distale de la nappe, épaisse de 5 à 15 m sur le piémont de Vitor, est meuble et riche en ponces et en

xénolites arrachés au batholite, pris dans une matrice riche en quartz, sanidine et biotite. L'unité sommitale de La Joya, à l'amont du río Chili, et la partie distale de cette ignimbrite près de la ville éponyme, à 40 km à l'WSW d'Arequipa, ont livré deux âges ⁴⁰Ar–³⁹Ar sur sanidine similaires : $4,88 \pm 0,22$ et $4,87 \pm 0,02$ Ma (Tableau 1).

2.3. La nappe ignimbritique « aéroport d'Arequipa »

La nappe « aéroport d'Arequipa » forme le sommet du remplissage du bassin et se subdivise en deux unités d'écoulement : une blanche à la base et une rose au sommet, sans sédiments intercalés, mais dont le contact devient plus tranché vers l'amont du bassin. En rive droite du río Chili, des lits de retombées pliniennes épais de 8 m séparent la nappe de La Joya de l'unité rose de la nappe « aéroport d'Arequipa ». D'après la superficie et les épaisseurs connues (Figs. 1 et 2), le volume de cette nappe est estimé à 20 km³ (Tableau 1).

À la base, l'unité d'écoulement blanche repose sur des alluvions qui la séparent de l'ignimbrite La Joya

en position distale, au sud-ouest du bassin (Fig. 2). Elle forme une séquence de refroidissement, épaisse de 100 m au sud-ouest du bassin d'Arequipa, dans les paléo-affluents du río Chili, près de la confluence avec le río Yura (Fig. 2). Au contraire, elle devient un tuf peu soudé mais dévitrifié et induré, qui s'amincit vers l'Est et le Sud-Est du bassin d'Arequipa. Sa matrice est riche en ponces non déformées, altérées et à vésicules arrondies, en fragments laviques, en obsidiennes et en cristaux libres. Au sommet, l'unité rose correspond à une ou deux coulées de ponces fibreuses centimétriques, riches en clastes d'andésite, notamment au nord et au NNW du bassin. Vers l'Ouest et le Nord-Ouest du bassin, l'unité rose est surmontée par de minces dépôts détritiques sur le piémont du Chachani, puis par les coulées de lave pléistocènes des dômes de la Pampa de Palacio. Vers le Nord-Est du bassin, les brèches hydroclastiques (non datées) de la base du massif du Chachani viennent recouvrir l'unité rose en l'érodant. Celle-ci a été datée à environ 1,65 Ma (Tableau 1).

2.4. Les tufs de Yura du Quaternaire ancien

Des ignimbrites beaucoup moins volumineuses ont été émises au Quaternaire par les paléovolcans antérieurs aux édifices récents comme le Misti, donc avant 0,83 Ma [9]. Les tufs de Yura épais de 10 à 50 m et très faiblement indurés forment une série de lits cendreux riches en ponces, en obsidiennes et pauvres en xénolites. Ces tufs dans lesquels s'intercalent des dépôts pyroclastiques remaniés ont été canalisés dans la vallée du río Yura. Des ponces de ces tufs ont été datées à 1,02 Ma (Tableau 1) et leur volume est estimé à environ 1,5 km³. Des téphras et une ignimbrite de la formation Capillune affleurent à l'est du Chachani, sur l'altiplano. Attribués au Quaternaire [11] et équivalents stratigraphiques des tufs de Yura, ils attestent qu'une activité pyroclastique a précédé l'édification du complexe du Chachani.

3. Corrélations fondées sur la minéralogie et la géochimie des éléments en traces

Les ignimbrites néogènes d'Arequipa ont des compositions de rhyolites calco-alkalines (72,9–75,4 % pds SiO₂) riches en K₂O (4–6,7 % pds) (Tableau 1).

Comme les variations des éléments majeurs sont faibles (1,5 %), nos corrélations s'appuieront davantage sur la minéralogie et la géochimie des éléments en traces.

3.1. Minéralogie

Toutes les ignimbrites sont des tufs comprenant 60 à 80 % de verre et ponces, 15 à 30 % de cristaux et 5 à 25 % de xénolites. La première corrélation est fondée sur les cortèges de minéraux (Tableau 1), mais ils ne fournissent pas de critères de distinction suffisants. L'ignimbrite de río Chili est à plagioclase, sanidine, quartz, oxydes Fe–Ti et pourcentages élevés de biotites (16 %) et d'amphiboles (17 %). Le cortège minéralogique de La Joya est un peu différent : plagioclase > sanidine > quartz 18 % > biotite > oxydes Fe–Ti > amphibole 4 % ; les pourcentages élevés de quartz (18 %) et de sanidine (30 %) caractérisent La Joya. La nappe « aéroport d'Arequipa » comprend deux unités, mais la minéralogie des ponces altérées de l'unité blanche n'est pas connue. La matrice vitreuse contient du plagioclase, du quartz, mais aussi de la cristobalite et de la tridymite. L'unité rose contient des ponces fibreuses subaphyriques dans une matrice oxydée par l'hématite, avec des cristaux libres semblables à ceux des ponces : plagioclase, biotite, opaques, rares quartz et sanidine. Cette unité rose contient beaucoup moins de quartz que la blanche et que La Joya. Les tufs de Yura possèdent des ponces très pauvres en cristaux (plagioclase > sanidine, quartz, biotite > opaques).

3.2. Géochimie des éléments en traces

Vingt-six analyses XRF et ICP–MS des éléments en traces de ponces sont utilisées pour caractériser les nappes d'ignimbrite. Le Tableau 2 présente une sélection des analyses les plus représentatives. L'examen des éléments incompatibles met en évidence deux groupes, qui correspondent à des ignimbrites d'âges différents : le premier comprend celles de río Chili et La Joya, caractérisées par des teneurs en Th et U élevées (Tableau 2 : 15–27 ppm ; 3,5–6,2 ppm). Identifié au contraire par des teneurs en Th et U faibles (Tableau 2 : 3–7,5 ppm et 0,4–2 ppm), le second groupe rassemble les ignimbrites les plus récentes,

Tableau 2

Analyses chimiques représentatives des ponces des ignimbrites de la région d'Arequipa. Les éléments majeurs ainsi que le Sc, V, Co, Cr, Ni, Rb, Sr, Y, Nb, Zr sont des données XRF. Les autres éléments en traces sont des données ICP-MS. Les éléments majeurs sont recalculés à 100 % anhydres

Table 2

Representative pumice chemical analyses of Arequipa ignimbrites. Major elements and Sc, V, Co, Cr, Ni, Rb, Sr, Y, Nb, Zr are analysed with XRF method. Other trace elements are ICP-MS data. Major elements are recalculated to 100% anhydrous

Échantillons	Tufs de Yura		Ignimbrite «aéroport d'Arequipa», unités rose et blanche				Ignimbrite La Joya		Ign. río Chili
	PIG-02-64	PIG-02-59	PIG-00-16	PIG-00-42	PIG-00-22	PIG-02-79	PIG-00-19b	PIG-00-34	PIG-00-18b
SiO ₂	75,21	74,56	75,16	73,66	74,19	74,95	75,34	75,83	72,91
TiO ₂	0,20	0,23	0,18	0,22	0,22	0,19	0,17	0,15	0,22
Al ₂ O ₃	13,61	13,89	13,76	13,90	13,99	13,83	13,72	12,92	14,64
FeO	1,20	1,33	1,07	1,53	1,39	1,09	1,04	0,91	1,54
MnO	0,08	0,08	0,07	0,08	0,08	0,08	0,03	0,06	0,04
MgO	0,23	0,30	0,27	0,46	0,32	0,30	0,11	0,14	0,27
CaO	0,97	1,08	1,07	1,46	1,22	1,07	0,70	0,78	1,06
Na ₂ O	3,83	4,06	4,10	4,43	4,50	3,99	4,05	4,34	4,64
K ₂ O	4,64	4,42	4,27	4,19	4,04	4,47	4,82	4,85	4,62
P ₂ O ₅	0,04	0,05	0,05	0,06	0,06	0,04	0,01	0,02	0,05
Nb	11,00	12,00	13,00	11,00	12,00	12,00	12,00	12,00	10,00
Zr	95,23	122,76	76,22	76,33	67,30	69,51	61,78	72,85	81,10
Y	15,00	16,00	14,00	14,00	14,00	14,00	16,00	16,00	18,00
Sr	169,00	196,00	206,00	209,00	208,00	178,00	96,00	82,00	208,00
Rb	115,00	113,00	104,00	109,00	109,00	112,00	201,00	206,00	199,00
Ni	2,00	2,00	0,00	5,00	2,00	7,00	3,00	1,00	2,00
Co	4,00	2,00	1,00	3,00	1,00	2,00	1,00	1,00	3,00
Cr	6,00	10,00	5,00	12,00	7,00	7,00	1,00	3,00	8,00
V	12,00	11,00	11,00	15,00	13,00	14,00	11,00	10,00	11,00
Ba	1175,00	1087,00	1239,00	1121,00	1168,00	1178,00	731,00	502,00	1025,00
Sc	6,00	3,00	2,00	2,00	4,00	5,00	2,00	2,00	4,00
Li			16,23	16,12	13,07	17,99	25,98	6,65	25,39
La	15,57	9,06	31,72	18,12	20,68	28,30	28,91	24,17	27,17
Ce	44,58	38,42	67,50	47,39	50,78	58,54	57,02	51,89	58,77
Pr	3,14	2,05	6,30	3,60	3,93	5,35	5,14	4,67	5,03
Nd	10,20	6,79	21,21	12,20	13,43	17,67	16,10	14,93	16,21
Sm	1,90	1,46	3,16	1,88	1,92	2,60	2,37	2,16	2,41
Eu	0,76	0,69	0,68	0,45	0,47	0,55	0,47	0,35	0,56
Gd	1,78	1,38	2,40	1,45	1,56	1,96	1,93	1,66	1,86
Tb	0,27	0,23	0,33	0,21	0,22	0,28	0,26	0,25	0,25
Dy	1,18	1,08	1,85	1,18	1,25	1,57	1,45	1,53	1,44
Ho	0,27	0,25	0,37	0,24	0,24	0,29	0,30	0,31	0,29
Er	0,79	0,71	1,06	0,71	0,71	0,88	0,93	0,96	0,87
Tm	0,16	0,14	0,16	0,11	0,11	0,13	0,14	0,15	0,13
Yb	0,87	0,82	1,09	0,71	0,71	0,89	1,00	1,03	0,90
Lu	0,17	0,16	0,17	0,12	0,11	0,14	0,16	0,17	0,15
Hf	3,15	3,82	3,20	2,76	2,56	2,65	2,78	3,08	3,27
Ta	0,59	0,51	1,05	0,96	0,78	1,06	1,08	1,47	1,07
W	0,53	0,45	0,55	0,41	0,37	0,38	0,35	1,99	0,63
Pb	17,67	23,12	20,39	23,66	29,98	20,56	15,61	12,98	15,41
Th	4,98	3,01	8,64	4,52	4,63	6,74	27,11	25,68	20,82
U	0,69	0,52	1,10	0,56	0,58	0,84	4,50	6,08	3,99
Eu/Eu*	1,26	1,48	0,75	0,83	0,83	0,74	0,67	0,57	0,81

«aéroport d'Arequipa» et tufs de Yura. Ces différences peuvent refléter une participation crustale plus importante dans la genèse des rhyolites río Chili et La Joya. Les terres rares des ignimbrites néogènes révèlent trois groupes (Tableau 2). Les tufs de Yura sont les seuls à posséder une anomalie positive en Eu et le plus faible enrichissement en terres rares légères. Au contraire, l'ignimbrite La Joya présente l'anomalie la plus négative en Eu, associée à des teneurs faibles en Ba, caractéristique d'un fractionnement contrôlé par la sanidine. Les nappes «aéroport d'Arequipa» et río Chili montrent une anomalie en Eu très faiblement négative, associée à de plus fortes teneurs en Ba, donc probablement un fractionnement moindre de sanidine. En revanche, la teneur en Sr plus élevée dans ces nappes pourrait refléter un fractionnement contrôlé par le plagioclase. Ces variations de composition des magmas sont liées à la combinaison de plusieurs processus, comme l'enrichissement variable de la source au cours du temps, mais aussi la différenciation et la contamination des magmas au sein de la croûte.

4. Mise en place des ignimbrites dans le contexte géologique du Sud du Pérou

Le contexte de mise en place des ignimbrites repose sur nos observations de terrain, deux cartes géologiques [9,11], deux scènes Landsat (1986) et SPOT XS (1998) de la région d'Arequipa et enfin sur le MNT drapé (Fig. 1). La surface des ignimbrites préservées est estimée au minimum à 800 km². En retenant une épaisseur minimum de 60 m, le volume de toutes les ignimbrites néogènes est de l'ordre de 40 km³. Il faut y ajouter des tufs quaternaires et surtout une nappe du Miocène moyen, dont on ne peut estimer le volume (Fig. 1). Les corrélations stratigraphiques dans le Sud du Pérou indiquent que la nappe río Chili serait un équivalent des ignimbrites Huaylillas du Miocène moyen, datées par Thouret et al. [10] entre 13 et 16 Ma à l'ouest d'Arequipa. Elles ont précédé le soulèvement majeur des Andes et l'incision des canyons. En revanche, les nappes La Joya et Aéroport d'Arequipa sont pour l'essentiel contenues dans le bassin tectonique d'Arequipa, qui se serait probablement formé entre 13 et 5 Ma lors des phases tectoniques du Miocène supérieur [8].

5. Sources géographiques des ignimbrites

Nous ne connaissons pas la géométrie de la nappe miocène. Celle de la nappe La Joya suggère un écoulement provenant du nord (massif du Chachani ou altiplano au nord du Misti, à Sumbay), s'étalant vers le Sud-Ouest du bassin et s'amincissant vers le Sud-Est. Cette volumineuse ignimbrite a franchi le bassin en surmontant le batholite d'Arequipa et s'est étalée sur le piémont, à 60 km de la ville d'Arequipa. Il ne faut pas exclure, cependant, des mouvements verticaux relatifs du batholite et du bassin d'Arequipa postérieurs à 4,9 Ma. La géométrie des affleurements (Figs. 2 et 3) et le pendage régulier des unités dans le bassin autour du flanc sud du massif du Chachani indiquent que la nappe «aéroport d'Arequipa» provient probablement d'une zone située sous le complexe du Chachani. Ceci est confirmé par les mesures d'anisotropie de susceptibilité magnétique initiales [7] et les comptages lithologiques des xénolites dont la taille diminue progressivement du nord vers le sud-ouest et le sud-est, dans l'unité rose. Le volume des ignimbrites pliocènes (environ 40 km³) est probablement responsable de la formation d'une ou plusieurs caldera(s), bien qu'aucune structure de ce type ne soit identifiée à proximité du bassin d'Arequipa. Signalons pourtant l'escarpement de lave (bordure caldérique ?) faisant face, sur l'altiplano, au flanc est du massif du Chachani et la dépression de Salinas, à l'est du massif volcanique plio-quaternaire du Pichu-Pichu (Fig. 1). Les tufs quaternaires de Yura proviennent du Nord du massif du Chachani, à l'emplacement du Cerro Nocarani ou du Cerro Baquetane (Fig. 1).

6. Discussion : problèmes chronologiques, volcanologiques et magmatologiques

6.1. Les quatre nappes ignimbritiques

Elles sont bien séparées dans le temps : des sédiments et des retombées aériennes sont intercalés en position distale entre les ignimbrites «aéroport d'Arequipa» et La Joya et les âges ⁴⁰Ar–³⁹Ar les distinguent clairement. Des nappes ignimbritiques volumineuses sont mises en place deux fois en 3 Ma au Pliocène, alors qu'une période de repos apparente de 6 Ma les sépare des ignimbrites du Miocène supérieur. Durant

une période de repos volcanique apparent, deux phases tectoniques importantes ont eu lieu vers 10 et 7 Ma environ [7]. Le contact entre les deux unités de la nappe « aéroport d'Arequipa » devient plus tranché vers le nord et l'est du bassin. L'unité supérieure rose est datée à 1,65 Ma, mais l'unité inférieure blanche ne l'est pas encore. Cependant, une méthode de datation indépendante (trace de fission sur des obsidiennes de l'unité blanche près de l'aéroport) a donné un âge de $2,42 \pm 0,11$ Ma [12], voisin des âges K–Ar de $2,76 \pm 0,1$ Ma et $2,9 \pm 0,1$ Ma donnés par ces auteurs au tuf distal de Vitor sur le piémont, au sud-ouest, et à l'ignimbrite blanche, dans l'Ouest du bassin (Quebrada Cuico). L'absence de sédiment ou de sol entre les deux unités suggérait pourtant une période de repos relativement plus courte. Enfin, au cours du Pléistocène, le volume des ignimbrites émises (tufs de Yura) est plus faible d'un ordre de magnitude environ : ce déclin serait lié à la diminution du taux de convergence et au régime de distension prévalant dans la Cordillère occidentale [6].

6.2. La nappe La Joya

Elle est beaucoup plus étalée que ses homologues. Cette dispersion suggère un écoulement, soit énergétique (débit et vitesse élevés), soit très épais et volumineux, capable de surmonter le batholite d'Arequipa, à 350 m au-dessus de la surface actuelle du bassin et à plus de 20 km de la source présumée (si l'on exclut des mouvements verticaux relatifs postérieurs à 4,9 Ma). L'unité blanche de la nappe « aéroport d'Arequipa » est moins étalée et l'unité rose est constituée de coulées cendro-ponceuses, sans granoclassement, et dépourvues de banc riche en brèches, dont la mise en place suggère un débit et/ou un volume d'écoulement plus faible(s).

6.3. Les éléments en traces

Les éléments en traces, dont les terres rares, permettent de distinguer des groupes de composition concordants avec la stratigraphie (Tableau 2). Bien que faible, cette variation temporelle dans la composition permet de caractériser deux groupes, l'un Mio-Pliocène, l'autre Plio-Quaternaire. Ces faibles variations de composition pourraient refléter, entre autres processus, une participation plus ou moins importante

de la croûte continentale dans la genèse des magmas au cours du temps, ainsi que le fractionnement plus important de certains minéraux (sanidine). Les ignimbrites plus anciennes río Chili et La Joya se sont mises en place entre les événements tectoniques majeurs à environ 17, 10 et 7 Ma, à travers une croûte épaissie, qui pourrait expliquer l'importance de la contamination crustale. Les ignimbrites plus récentes, « aéroport d'Arequipa » et tufs de Yura, sont contemporaines d'une période de convergence moins rapide, associée à de l'extension en surface, qui serait moins favorable à la contamination des magmas dans la croûte.

7. Conclusion

Quatre nappes ignimbritiques ont été reconnues et datées dans le bassin d'Arequipa : río Chili à 13,3 Ma, La Joya à 4,9 Ma, « aéroport d'Arequipa » à 1,65 Ma, et enfin les tufs de Yura à 1,02 Ma. Les corrélations entre les unités ignimbritiques sont fondées sur leur géométrie, leur position stratigraphique, leur faciès, les datations ^{40}Ar – ^{39}Ar , sur la minéralogie et la géochimie des éléments en traces. Ces derniers permettent de distinguer de faibles différences de composition parmi les ignimbrites, liées à des variations d'épaisseur de la croûte continentale et/ou d'enrichissement de la source. Enfin, l'origine géographique des ignimbrites d'âge Miocène et Pliocène inférieur sont inconnues : l'altiplano au nord du Misti ou la dépression de Laguna Salinas à l'est du bassin d'Arequipa. En revanche, l'analyse du MNT (Fig. 1) et les critères sédimentologiques désignent la zone du massif volcanique du Chachani comme la source des ignimbrites du Pliocène terminal et des tufs de Yura.

Références

- [1] D.S. Barker, El sillar ocioso, *Bull. Volcanol.* 58 (1996) 317–318.
- [2] C.N. Fenner, Incandescent tuff flows in southern Peru, *Geol. Soc. Am. Bull.* 59 (1948) 879–893.
- [3] C. Guevara, Geología del cuadrángulo de Characato, Servicio de Geología y Minería, Bol. 23, Lima, 1969, 53 p., mapa a color 1/100 000.
- [4] W.F. Jenks, S.X. Goldish, Rhyolitic tuff flows in southern Peru, *J. Geol.* 64 (1956) 156–172.
- [5] C. Lefèvre, Un exemple de volcanisme de marge active dans les Andes du Pérou (Sud) du Miocène à l'Actuel, thèse, université

- des sciences et techniques du Languedoc, Montpellier, 1979, 555 p.
- [6] J.-L. Mercier, M. Sébrier, A. Lavenu, J. Cabrera, O. Bellier, J.-F. Dumont, J. Macharé, Changes in the tectonic regime above a subduction zone of Andean type: the Andes of Peru and Bolivia during the Pliocene–Pleistocene, *J. Geophys. Res.* 97 (1992) 11945–11982.
- [7] P. Paquereau, J.-C. Thouret, P. Roperch, M. Fornari, Neogene ignimbrites in the Arequipa region (Peru): correlations, flow directions and source location, *Am. Geophys. Union, Eur. Geophys. Soc. & Eur. Geophys. Union, Joint Assembly (2003)*, Nice, abstract & poster EAE03-A-10465 (VGP 10).
- [8] M. Sébrier, A. Lavenu, M. Fornari, J. Soulas, Tectonics and uplift in Central Andes (Peru, Bolivia and northern Chile) from Eocene to Present, *Géodynamique* 3 (1988) 85–106.
- [9] J.-C. Thouret, A. Finizola, M. Fornari, A. Legeley-Padovani, J. Suni, M. Frechen, Geology of El Misti volcano near the city of Arequipa, Peru, *Geol. Soc. Am. Bull.* 113 (12) (2001) 1593–1610.
- [10] J.-C. Thouret, G. Wörner, B. Singer, A. Finizola, A. Legeley-Padovani, Valley evolution, uplift, volcanism and related hazards on the western slope of the central Andes, *Am. Geophys. Union, Eur. Geophys. Soc. & Eur. Geophys. Union, Joint Assembly, 2003*, Nice, abstract & poster EAE03-A-10498, TS7.
- [11] L. Vargas, Geología del cuadrángulo de Arequipa, Servicio de Geología y Minería, Bol. 24, Lima, 1970, 64 p., mapa a color 1/100 000.
- [12] N. Vatin-Pérignon, G. Poupeau, R.A. Oliver, A. Lavenu, E. Labrin, F. Keller, L. Bellot-Gurlet, Trace and rare-earth element characteristics of acidic tuffs from southern Peru and northern Bolivia and a fission-track age for the Sillar of Arequipa, *J. South Am. Earth Sci.* 9 (1–2) (1996) 91–109.