



Tectonique

Métabasites de la cordillère occidentale d'Équateur, témoins du soubassement océanique des Andes d'Équateur

Émilie Beaudon^a, Jean-Emmanuel Martelat^{a,*}, Andrea Amórtegui^a,
Henriette Lapierre^a, Etienne Jaillard^{a,b}

^a Laboratoire de géodynamique des chaînes alpines, UMR–CNRS 5025, université Joseph-Fourier, Maison des Géosciences, BP 53, 38041 Grenoble cedex 09, France

^b Institut de recherche pour le développement (UR 154), LMTG, Observatoire Midi-Pyrénées, 14, av. Edouard Belin, 31400 Toulouse, France

Reçu le 20 septembre 2004 ; accepté après révision le 21 décembre 2004

Disponible sur Internet le 8 mars 2005

Présenté par Jean Dercourt

Résumé

La genèse des Andes est liée à la subduction de la lithosphère pacifique sous le continent sud-américain. Cependant, alors que la formation des Andes centrales est dominée par le raccourcissement de la croûte continentale, celle des Andes septentrionales est marquée par l'accrétion et le sous-placage de matériel océanique exotique. L'étude de différentes roches magmatiques et métamorphiques de la cordillère occidentale d'Équateur, exhumées à la faveur d'accidents transpressifs dextres miocènes recoupant les terrains accrétés, permet de contraindre la nature et l'évolution thermique de la racine de cette partie des Andes. Les compositions chimiques et isotopiques sont semblables à celles de basaltes de plateau océanique. Les conditions thermobarométriques, basées sur l'étude des paragenèses d'une granulite et d'une amphibolite, indiquent des températures d'équilibres de 800–850 °C pour des pressions inférieures à 6–9 kbar (absence de grenat). Ce gradient géothermique anormalement élevé ($\approx 40 \text{ °C km}^{-1}$) serait lié à l'activité de l'arc magmatique qui s'installe sur les terrains océaniques accrétés à la fin de l'Éocène, et a pu provoquer la remobilisation du matériel océanique sous-plaqué en profondeur lors de la genèse de l'arc néogène à récent.

Pour citer cet article : É. Beaudon *et al.*, *C. R. Geoscience* 337 (2005).

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

Abstract

The building-up of the Andean Range is linked to the subduction of the Pacific lithosphere beneath the South American plate. However, the formation of the Central Andes is marked by continental crustal shortening, whereas accretion and underplating of exotic oceanic terranes occurred in the northern Andes. The study of various magmatic and metamorphic rocks exhumed in the Western Cordillera of Ecuador by Miocene transpressive faults enables us to constrain the nature and thermal evolution of

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : martelat@ujf-grenoble.fr (J.-E. Martelat).

the crustal root of this part of Ecuador. These rocks are geochemically similar to oceanic plateau basalts. The thermobarometric peak conditions of a granulite and an amphibolite indicate temperatures of 800–850 °C and pressures less than 6–9 kbar (lack of garnet). The abnormally high geothermal gradient ($\approx 40\text{ °C km}^{-1}$) is probably due to the activity of the magmatic arc, which developed on the accreted oceanic terranes after Late Eocene times, and may have provoked the re-mobilisation of deeply underplated oceanic material during the genesis of the Neogene to Recent arc. **To cite this article:** É. Beaudon et al., C. R. Geoscience 337 (2005).

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

Mots-clés : Plateau océanique ; Métabasites ; Géochimie ; Racine crustale andine ; Équateur

Keywords: Oceanic plateau; Metabasites; Geochemistry; Andean crustal root; Ecuador

Abridged English version

1. Introduction

The building-up of the Andean belt is linked to the subduction of the Pacific lithosphere beneath the South American plate [12,18]. However, the processes of the Andean orogeny change latitudinally along the range. Continental crustal shortening predominated in the Central Andes [1,13,33], whereas accretion and underplating of exotic oceanic terranes occurred in the north [12,22,27,31], and likely contributed to the formation of the crustal root of the northern Andes [15,18].

In Ecuador, several oceanic plateau fragments overlain by island arcs were accreted to the Andean margin between 80 and 40 Ma, and presently crop out in the Western Cordillera (Fig. 1) [23,24,31]. From the Late Eocene onwards, a continent-based arc developed first in the Western Cordillera [11,21] and then, migrated farther east [2,9]. Since the Eocene, dextral, transpressive, multi kilometre-scale faults [16,20,28] affected the accreted oceanic terranes, triggering the formation of flower structures. In the studied area (Fig. 2), such north- to NNE-trending faults crosscut Oligocene deposits, and are offset by northeast-trending, dextral faults, which also crosscut Late Miocene volcanic units (Fig. 2). These Miocene faults exhumed varied slices of metabasites, metasediments, magmatic rocks and mantle-derived ultramafic rocks.

As a reconnaissance, five samples of these rocks were analysed in order to determine the nature and thermobarometric evolution of the root of the Western Cordillera.

2. Petrography and mineralogy of the magmatic and metamorphic rocks

Among the selected samples for chemical analyses, three rocks are undeformed and unmetamorphosed dolerites (samples 10, 11a, 16), while the two others are an amphibolite (sample 6, Fig. 3a) and a two pyroxene metabasite equilibrated under granulitic facies metamorphism that we named a ‘granulite’ (sample 12, Fig. 3b).

3. Geochemistry

3.1. Mineral chemistry

The clinopyroxene of two dolerites (sample 11a, 16) are Mg-rich augite (Table 1), similar to those of oceanic plateaus. The plagioclase of sample 16 is preserved and shows a labradorite–bytownite (An_{50–75}) composition while that of sample 11a, is replaced by albite.

The clinopyroxene of the amphibolite (sample 6) is a diopside (Table 1), similar in composition to that of the Piñon basalts [30]. In the granulite (sample 12), the clinopyroxene (diopside, Table 1) is systematically associated with the orthopyroxene (enstatite, Table 1). The amphiboles of both metamorphic rocks are magnesio-hornblendes (Table 1) [25]. Their high aluminium and titanium, and low silicon contents are compatible with high-grade amphiboles [32].

3.2. Major and trace elements, and isotopes

The dolerites (samples 10, 11a, 16) are characterized by flat primitive-mantle-normalized multi-element plots (Fig. 4B). Sample 11a differs from the others by an enrichment in LREE (Fig. 4A), which suggests an alkaline affinity. The absence of Nb and

Ta negative anomalies indicates that the dolerites did not ‘develop’ in an island-arc environment. The ε_{Nd} values (Table 2) of the dolerites fall in the range of oceanic plateau basalts [22].

The amphibolite (sample 6, Fig. 4, Table 2) shares with the dolerites similar elemental and Nd isotopic compositions. The granulite (sample 12, Fig. 4, Table 2) differs from the amphibolite and dolerites by a depletion in U, Th and LREE, which are the features of N-MORB and some Piñon dolerites [30]. However, the ε_{Nd} value of the granulite is similar to those of the dolerites and amphibolites. Therefore, we assume that the protoliths of the amphibolite and granulite were oceanic-plateau basalts.

4. Physical conditions of metamorphism

Based on the granulite and the amphibolite mineral assemblages, the thermobarometric analysis indicates temperatures of 800–850 °C and pressures lower than 6–9 kbar (lack of garnet [14,29]). The temperatures were determined on the basis of the amphibole + plagioclase + quartz paragenesis [8] and the association of orthopyroxene and clinopyroxene in equilibrium [6,7]. Taking into account the mafic composition of the metamorphic rocks, the lack of garnet suggests that the pressure conditions of the metamorphism were less than 6–9 kbar for 800 °C [14,29].

These preliminary data suggest that, during Miocene times, a high geothermal gradient (~ 40 °C km⁻¹) occurred beneath the volcanic arc. Since the present-day crustal root of the Ecuadorian Andes is in excess of 50 km [15], it is likely that during the Miocene, the oceanic root was deep enough to undergo remobilisation, or even partial melting, and thus to contribute to the Neogene arc magmatism.

5. Conclusions

In the Western Cordillera of Ecuador, Miocene transpressive fault exhumed mafic igneous and metamorphic rocks, which display trace element and Nd isotopic compositions similar to those of oceanic plateau basalts. Thus, they likely represent remnants of the Cretaceous oceanic plateaus that accreted to the Ecuadorian margin between ~ 80 and 40 Myr. These rocks likely constitute the root of the Western Cordillera. Based on the paragenesis of a granulite and

an amphibolite, metamorphic peak conditions would be temperatures of 800–850 °C and pressures lower than 6–9 kbar. This very high geothermal gradient (≈ 40 °C km⁻¹) is probably related to the activity of the magmatic arc, which developed after the Late Eocene on the Western Cordillera. Taking into account these high-temperature conditions at depth, the accreted/underplated oceanic material may have contributed to the magma genesis of the Neogene–Recent continental arc.

1. Introduction

L’orogène andin est lié à la subduction de la lithosphère océanique paléo-pacifique sous le continent sud-américain depuis le Jurassique inférieur [12,18]. Les processus de formation de la chaîne semblent varier latitudinalement : alors que les Andes centrales sont dominées par le raccourcissement de la croûte continentale [1,13,33], les Andes du Nord sont marquées par l’accrétion et le sous-placage de terrains exotiques d’origine océanique [12,22,27,31], qui semblent en former la racine crustale [15,19].

En Équateur, plusieurs plateaux océaniques créta-cés surmontés d’arcs insulaires se sont accrétés entre ~ 80 et 40 Ma (Fig. 1) [23,24,26,31], et affleurent actuellement dans la cordillère occidentale (Figs. 1, 2). À partir de l’Éocène terminal–Oligocène inférieur, un arc magmatique continental s’est développé sur la cordillère occidentale [11,21], avant de migrer vers l’est [2,9]. À partir de l’Éocène, les terrains accrétés et leurs sutures ont été recoupés par des accidents pluri-kilométriques transpressifs dextres [17,20,28], appartenant au système Dolores–Guayaquil Megashear, qui ont induit des structures « en fleurs » (Fig. 2). Entre Riobamba et Guaranda, ces failles subverticales décrochantes, orientées nord–sud à NNE–SSW, recoupent les dépôts oligocènes et sont ultérieurement décalées par des failles dextres NE–SW recoupant les unités volcaniques du Miocène supérieur (Fig. 2, [20]). Elles ont provoqué l’exhumation d’écailles variées de métabasites de haut grade, de métasédiments (cherts, radiolarites), de roches magmatiques non déformées et d’ultrabasites mantelliques foliées (pyroxénites, harzburgites, lherzolites à plagioclase). Ces roches sont parfois bréchifiées par des accidents superficiels plus récents.

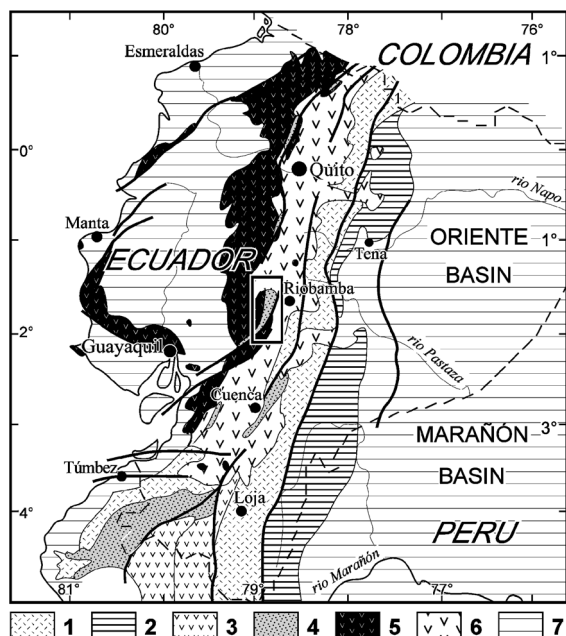


Fig. 1. Schéma géologique d'Équateur illustrant le contexte géologique. (1) Substratum métamorphique; (2) Mésozoïque de la Zone subandine; (3) arc volcanique crétacé–paléogène; (4) dépôts d'avant-arc crétacés–paléocènes; (5) croûte et arcs océaniques crétacés–paléogènes; (6) arc volcanique tertiaire à quaternaire; (7) bassin oriental cénozoïque–quaternaire.

Fig. 1. Geological sketch of Ecuador showing the geological setting. (1) Metamorphic basement; (2) Mesozoic of the Subandean Zone; (3) Cretaceous–Palaeogene continental arc; (4) Cretaceous–Palaeogene forearc deposits; (5) Cretaceous–Palaeogene oceanic crust and arcs; (6) Tertiary–Quaternary volcanic arc; (7) Tertiary–Quaternary eastern Basin.

Fig. 2. Carte géologique de la région étudiée. Les meilleures coupes peuvent être observées entre San Juan et Guaranda, et entre Sicalpa et Santiago [20]. **M** : métabasites étudiées; γ : granitoïdes indifférenciés; **Kj** : terrain accréte San Juan; **Kg** : terrain accréte Guaranda; **Ky** : turbidites Crétacé terminal; **Kc** : cherts Crétacé terminal; **Ps** : grès et conglomérats paléocènes; **Pm** : arc insulaire paléogène (?); **Ea** : turbidites éocènes; **Ov**, **Os** : volcanisme et conglomérats oligocènes; **Mv** : volcanisme Miocène supérieur; **Qv**, **Qg**, **Q** : formations volcaniques, glaciaires et alluviales quaternaires.

Fig. 2. Geological map of the studied area. The best sections were studied along the San Juan–Guaranda, and Sicalpa–Santiago roads [20]. **M**: studied metabasites; γ : undifferentiated granitoids; **Kj**: San Juan accreted terrane; **Kg**: Guaranda accreted terrane; **Ky**: Latest Cretaceous turbidites; **Kc**: Latest Cretaceous cherts; **Ps**: Palaeocene sandstones and conglomerates; **Pm**: Paleogene (?) island arc; **Ea**: Eocene turbidites; **Ov**, **Os**: Oligocene volcanic rocks and conglomerates; **Mv**: Late Miocene volcanic rocks; **Qv**, **Qg**, **Q**: Quaternary volcanic, glacial, and alluvial deposits.

Cinq roches exhumées par ces failles submériennes miocènes ont été étudiées du point de vue pétrographique, géochimique et thermobarométrique, afin de déterminer (1) la nature de la racine crustale de la cordillère occidentale, et (2) les conditions thermo-

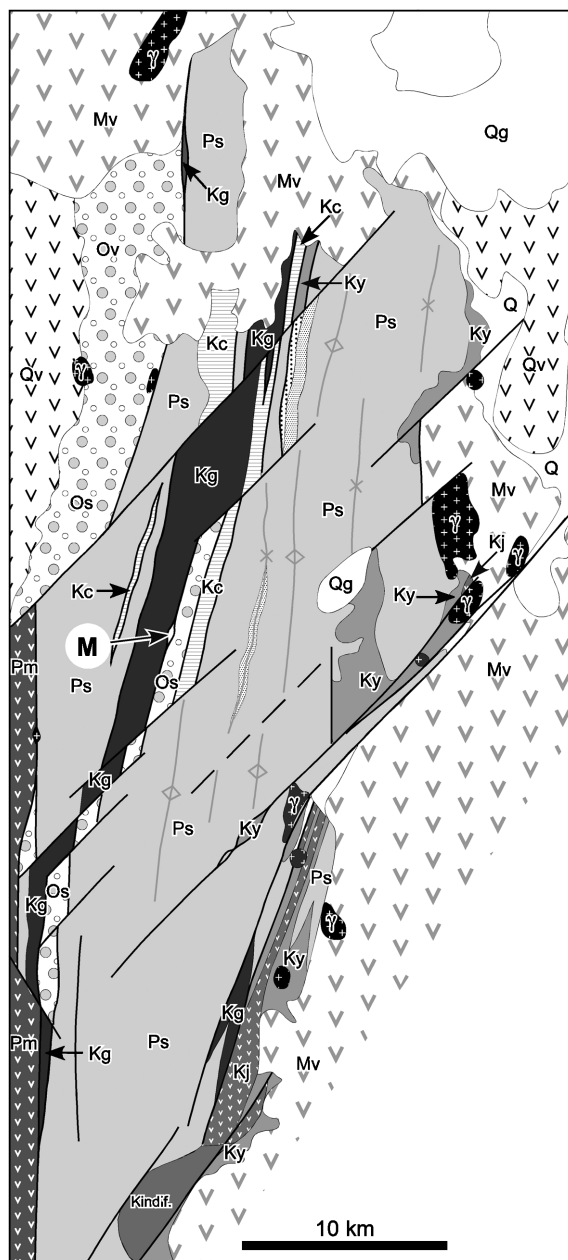


Fig. 2.

barométriques subies par les parties profondes de l'arc magmatique entre l'Oligocène et l'Actuel.

2. Pétrographie et minéralogie

Parmi les roches étudiées, on a sélectionné trois roches magmatiques non déformées et non métamorphisées (éch. 10, 16 et 11a) et deux roches métamorphiques (éch. 6 et 12). Les trois roches magmatiques sont des dolérites, caractérisées par des plagioclases en baguettes cimentées par des clinopyroxènes. L'une d'elles (éch. 16) contient des clinopyroxènes centimétriques subautomorphes, de grandes lattes de plagioclase jouxtant des cristaux d'épidote, et de l'olivine complètement serpentinisée et chloritisée. La dolérite (éch. 11a) se différencie de la précédente par la présence de quartz, d'oxydes peu abondants, et l'absence d'olivine.

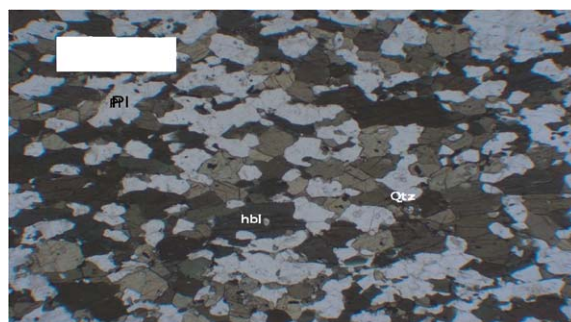
L'échantillon 6 est une amphibolite à texture relativement équilibrée, avec une faible fabrique marquée par l'allongement des amphiboles (Fig. 3a) et des plagioclases. Quelques cristaux de quartz sont également visibles. Les trois phases minérales sont en contact et aucun oxyde n'est présent.

La dernière metabasite à deux pyroxènes est équilibrée dans le faciès métamorphique des granulites et sera nommée granulite (éch. 12). Elle est caractérisée par la présence d'une foliation, marquée par des pyroxènes allongés (opx, cpx ; Fig. 3b), du quartz lenticulaire et du plagioclase légèrement altéré. Ces quatre phases sont en contact avec des limites de grain nettes, caractéristiques de phases à l'équilibre. Les oxydes sont présents et parfois inclus dans les orthopyroxènes, indiquant une forte fugacité d'oxygène. De petits cristaux d'amphibole se développent à la périphérie des clinopyroxènes et des fentes tardives recoupent la foliation originelle, qui est associée à la cristallisation d'amphibole verte foncée et de quartz tardif.

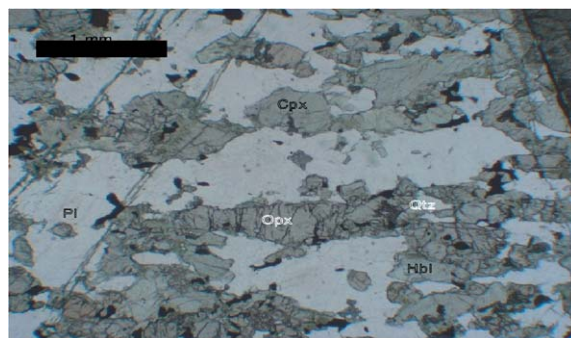
3. Géochimie

3.1. Chimie des minéraux

Dans les deux dolérites (éch. 16–11a), les pyroxènes ont des compositions d'augite magnésienne ($Wo_{40-50}En_{55-42}Fs_{11-22}$; Tableau 1). Leur faible teneur en Ti et Cr (TiO_2 : 0,3–0,7 wt% ; Cr_2O_3 :



(a)



(b)

Fig. 3. Microphotographies représentatives des échantillons. (a) La foliation est marquée par l'allongement des grains millimétriques d'amphibole verte et de plagioclase. (b) Les orthopyroxènes et clinopyroxènes en contact soulignent la foliation métamorphique. On remarque quelques grains d'amphiboles vertes de petites tailles à la périphérie des clinopyroxènes.

Fig. 3. Microphotographs of the analysed samples. (a) The foliation is marked by the millimetre-sized green amphibole and plagioclase. (b) The metamorphic foliation is outlined by orthopyroxene and clinopyroxene, which is locally rimmed by green amphibole.

0–0,9 wt%) et leur enrichissement en Fe indiquent l'affinité tholéiitique de ces dolérites. Les pyroxènes de la dolérite (éch. 11a) sont comparables à ceux des basaltes de plateau océanique de la formation Piñón [30]. Les pourcentages totaux en poids d'oxydes de ces phases (97 %), inférieurs à 100 %, suggèrent l'incorporation de Fe_2O_3 dans le pyroxène. Dans l'échantillon 16, le plagioclase a une composition de labrador–bytownite (An_{50-75}), tandis que dans l'échantillon 11a, le plagioclase est remplacé par de l'albite secondaire (Ab_{100}).

Les pyroxènes de l'amphibolite (éch. 6) se situent dans le champ des diopsides ($Wo_{47-49}En_{34-35}Fs_{18-20}$, Tableau 1) et sont semblables à ceux des basaltes de

Tableau 1

Analyses représentatives des minéraux magmatiques et métamorphiques des roches d'Équateur. Les analyses en éléments majeurs des minéraux ont été réalisées à la microsonde Cameca SX-100 du service commun de microsonde de l'université de Montpellier-2. Les conditions analytiques standard comprennent une tension de 20 kV, un courant de 10 nA, un diamètre de faisceau de 1 µm et des temps de comptage de 20–30 s suivant les éléments mesurés

Table 1

Representative analyses of the igneous and metamorphic minerals of the Ecuadorian rocks. Mineral analyses were carried out on the CAMEBAX SX100 electron microprobe fitted with five wavelength spectrometers at the 'Service commun de microsonde', University Montpellier-2, France. The standard working conditions were 20 kV and 10 nA, with a beam size of 1 µm and integrated counting times of 20–30 s

Échantillon	12					6					
wt% oxydes	cpx	cpx	opx	opx	pl	amp	amp	amp	pl		
SiO ₂	51,51	52,35	52,05	52,27	49,87	SiO ₂	47,25	46,24	SiO ₂	53,82	
TiO ₂	0,27	0,17	0,11	0,10	0,00	TiO ₂	1,19	8,28	TiO ₂	0,00	
Al ₂ O ₃	1,72	1,51	1,08	0,68	32,14	Al ₂ O ₃	8,06	17,40	Al ₂ O ₃	29,19	
Cr ₂ O ₃	0,08	0,07	0,05	0,04	0,02	Cr ₂ O ₃	0,13	0,28	Cr ₂ O ₃	0,00	
FeOt	9,31	8,52	23,80	23,36	0,11	FeOt	13,63	11,38	FeOt	0,25	
MnO	0,23	0,21	0,47	0,50	0,01	MnO	0,13	11,69	MnO	0,01	
MgO	14,19	14,13	22,02	22,60	0,00	MgO	14,18	1,12	MgO	0,01	
CaO	21,00	22,25	0,76	0,68	14,33	CaO	11,50	0,09	CaO	10,90	
Na ₂ O	0,37	0,32	0,01	0,02	3,14	Na ₂ O	1,24	1,28	Na ₂ O	4,91	
K ₂ O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	K ₂ O	0,06	0,01	K ₂ O	0,02	
Total	98,66	99,54	100,35	100,24	99,63	Total	97,36	97,77	Total	99,12	
Cations pour	6				8		23	23		8	
Si	1,95	1,96	1,95	1,96	2,28	Si	6,90	6,85	Si	2,45	
AlIV	0,05	0,04	0,05	0,03	1,73	AlIV	1,10	1,15	Al	1,56	
AlVI	0,03	0,03	0,00	0,00		AlVI	0,29	0,30			
Fe2+	0,30	0,27	0,75	0,73	0,00	Ti	0,13	0,14	Fet	0,01	
Mn	0,01	0,01	0,02	0,02	0,00	Cr	0,02	0,00	Mn	0,00	
Mg	0,80	0,79	1,23	1,26	0,00	Fe2+	1,49	1,93	Mg	0,00	
Ca	0,85	0,89	0,03	0,03	0,70	Fe3	0,17	0,23	Ca	0,53	
Na	0,03	0,02	0,00	0,00	0,28	Mn	0,02	0,04	Na	0,43	
K	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Mg	2,89	2,37	K	0,00	
Ti	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	MgM4	0,20	0,14	Ti	0,00	
Cr	0,00	0,00	0,00	0,00		Ca	1,80	1,86			
						NaM4	0,00	0,00			
Total	4,02	4,01	4,02	4,03	4,99	NaA	0,35	0,32	Somme	4,99	
						K	0,01	0,02			
Wo	43,58	45,67	1,51	1,34	An	71,56	Total	15,36	15,34	An	55,00
En	40,96	40,34	60,85	61,95	Ab	28,40	XMg	0,67	0,57	Ab	44,86
Fs	15,46	13,99	37,64	36,71	Or	0,04	XFe3	0,38	0,43	Or	0,14
							(Na+K)A	0,36	0,34		

la formation Piñón [30]. Dans la granulite (éch. 12), les clinopyroxènes, systématiquement associés aux enstatites (Wo_{1–2}En_{60–62}Fs_{36–38}) sont des diopsides (Wo_{45–43}En_{41–40}Fs_{13–15}, Tableau 1) moins calciques que ceux de l'amphibolite.

Les plagioclases (labrador) de l'amphibolite (éch. 6) sont un peu moins calciques (An₅₅) que ceux de la granulite (éch. 12), dans laquelle on trouve de la by-

townite (An₇₂, Tableau 1). Les amphiboles de ces deux échantillons sont des magnésio-hornblendes [25] (Tableau 1). Elles présentent des compositions comparables à celles des faciès métamorphiques de haut degré, caractérisées par des teneurs fortes en aluminium et en titane, et faibles en silicium (Al_{total} > 1,3; Ti > 0,13; Si < 7; p.f.u. calculé sur 23 oxygènes [32]).

3.2. Éléments majeurs et traces, et isotopes du Nd et du Sr

Les dolérites (éch. 16, 10) présentent des spectres multi-éléments plats, typiques de basaltes de plateau océanique (Fig. 4). La dolérite (éch. 11a) se distingue par un léger enrichissement en LREE (Fig. 4), suggérant une tendance vers une affinité alcaline. Dans ces trois échantillons, l'absence systématique de l'anomalie négative en Nb et en Ta montre qu'il ne s'agit pas de lave d'arc. Les rapports isotopiques ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_i initiaux (100 Ma) des dolérites sont relativement homogènes, avec des valeurs comprises entre 0,51290 et 0,51296. Leurs ε_{Nd} sont compris entre +7 et +8 (Tableau 2). Ainsi, les caractères géochimiques des dolérites et leurs compositions isotopiques en Nd sont comparables à ceux de basaltes de plateau océanique [22].

La composition en éléments traces de l'amphibolite (éch. 6) est semblable à celle des dolérites (éch. 16 et 10) à affinité de plateau océanique (spectre multi-éléments plat, La/Nb < 1). De même, cette amphibolite présente un rapport isotopique initial du ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_i (0,51291) et une valeur de ε_{Nd} de +7,9, semblables à ceux des dolérites (éch. 16 et 10). Ainsi, le protolithe de cette amphibolite est un basalte de plateau océanique.

Le spectre des terres rares de la granulite (éch. 12, Fig. 4) montre un appauvrissement significatif en LREE, pouvant indiquer une affinité de N-MORB, mais le diagramme multi-éléments est identique à celui d'un basalte de plateau océanique. En particulier, il est identique à ceux de certains basaltes de plateau de la formation Piñón (éch. 99Gy2 de [30]). Les valeurs des rapports isotopiques du ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_i = 0,51289, de ε_{Nd} = +7,6 et du ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i = 0,738 sont très proches de celles de l'amphibolite (éch. 6). Les caractères géochimiques et isotopiques (ε_{Nd} = +7,6) de cette granulite permettent donc de considérer qu'elle représente un fragment métamorphisé de la partie effusive d'un plateau océanique.

4. Conditions physiques du métamorphisme

La majorité des roches métamorphiques collectées montre des paragenèses d'amphibolites à amphibole–plagioclase–quartz (par exemple, éch. 6). Leur folia-

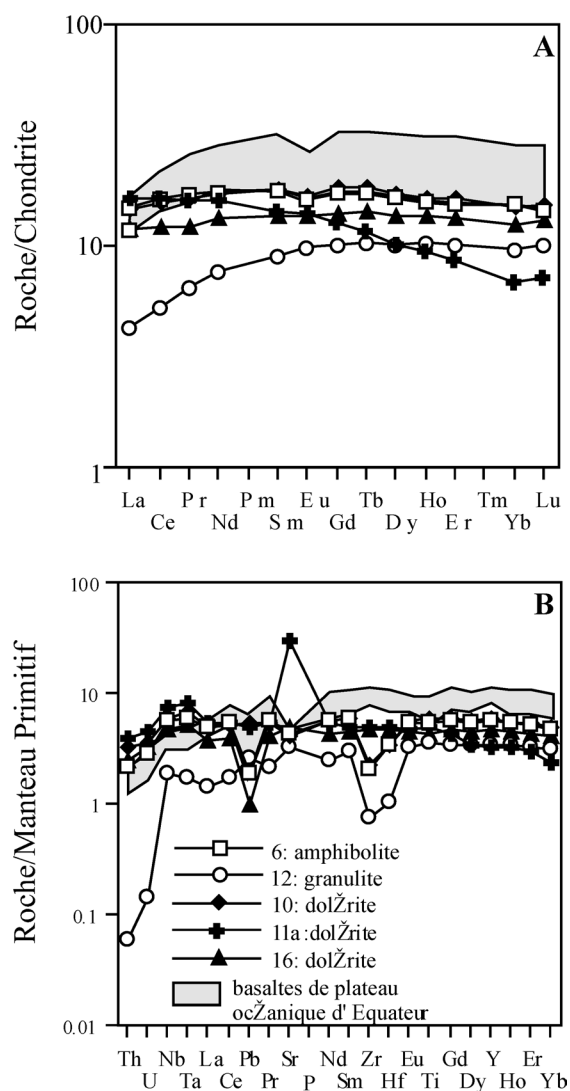


Fig. 4. (A) Spectres de terres rares des roches magmatiques et métamorphiques d'Équateur normalisés aux chondrites selon [34]. (B) Spectres multi-élémentaires des roches magmatiques et métamorphiques d'Équateur normalisés au manteau primitif selon [34].

Fig. 4. (A) Chondrite-normalized (after [34]) rare earth element patterns of the magmatic and metamorphic rocks from Ecuador. (B) Primitive mantle-normalized (after [34]) multi-element plots of the magmatic and metamorphic rocks from Ecuador.

tion est synchronique du métamorphisme qui les a affectée. Seule une roche métamorphique est à orthopyroxène–clinopyroxène–plagioclase–quartz (éch. 12). Ce dernier type d'assemblage correspond au faciès des granulites de pression intermédiaire [10,14]. L'as-

Tableau 2

Analyses géochimiques et isotopiques des dolérites et des roches métamorphiques d'Équateur. Les analyses géochimiques des éléments majeurs (F. Keller) ont été réalisées par ICP–AOS au LGCA. La teneur en silice est estimée sur la différence entre la somme des oxydes et la perte au feu et 100 %. Les analyses des éléments traces ont été réalisées par ICP–MS (F. Keller) au LGCA de l'université Joseph-Fourier de Grenoble suivant les procédures de [3]. Les standards utilisés sont Bir-1 et Bhvo-2. Les rapports isotopiques du Nd et du Sr ont été mesurés (P. Brunet) sur un spectromètre de masse à thermo-ionisation Finnigan 261 à l'université Paul-Sabatier de Toulouse. Les standards utilisés sont, pour le Nd, le standard de Rennes et, pour le Sr, NBS 987. Les éluions du Sr et du Nd ont été réalisées en salle blanche au LGCA (UMR 5025) selon les procédures de [24]

Table 2

Chemical and isotopic compositions of the dolerites and metamorphic rocks from Ecuador. Major elements were determined by ICP–AOS at the LGCA (F. Keller). The SiO₂ content is estimated from the difference between the total oxides and loss of ignition (LOI) and 100%. Trace elements, including the REE, were analysed by ICP–MS at the LGCA of the Joseph-Fourier University (Grenoble, France), using the procedures of [3]. The used standards were Bir-1 et Bhvo-2. Sr and Nd isotopic ratios were measured (P. Brunet) at the 'Laboratoire de géochimie isotopique de l'université Paul-Sabatier', Toulouse, France, on a Finnigan MAT261 multicollector mass spectrometer using the analytical procedures described by [24]. The standard used for Nd and Sr are the Rennes standard and NBS 987, respectively

	6	10	11a	12	16
SiO ₂	49,43	46,51	54,02	49,63	51,54
TiO ₂	1,17	1,32	1,07	0,79	0,95
Al ₂ O ₃	12,89	14,32	11,19	10,59	13,56
Fe ₂ O ₃	12,19	13,09	9,74	14,37	10,38
MnO	0,25	0,26	0,18	0,26	0,17
MgO	9,96	9,64	6,72	11,77	7,85
CaO	9,44	10,92	12,2	11,13	11,06
Na ₂ O	1,98	2,36	2,92	1,07	2,15
K ₂ O	0,11	0,13	0,03	0,02	0,33
Total	50,57	53,49	45,98	50,37	48,46
Th	0,19	0,278	0,333	0,005	0,213
U	0,062	0,077	0,095	0,003	0,069
Nb	4,146	4,4	5,419	1,36	3,377
Ta	0,245	0,28	0,337	0,07	0,213
La	3,43	3,392	3,863	1,007	2,672
Ce	9,753	9,361	10,021	3,139	7,229
Pr	1,577	1,531	1,521	0,606	1,144
Pb	0,352	1,026	0,922	0,477	0,186
Nd	8,003	7,855	7,458	3,483	6,043
Sr	90,708	89,931	658,784	70,382	107,157
Sm	2,681	2,699	2,192	1,361	2,062
Zr	23,324	25,775	55,235	8,637	54,481
Hf	1,067	1,084	1,538	0,324	1,472
Eu	0,943	0,964	0,814	0,561	0,777
Gd	3,524	3,666	2,611	2,045	2,829
Tb	0,638	0,671	0,433	0,378	0,516
Dy	4,136	4,305	2,564	2,519	3,392
Ho	0,895	0,908	0,537	0,569	0,746
Er	2,532	2,649	1,428	1,619	2,139
Y	26,239	27,494	14,832	15,922	22,112
Yb	2,393	2,485	1,157	1,59	2,066
Lu	0,364	0,381	0,179	0,253	0,324
La/Yb	1,43	1,36	3,33	0,63	1,29
La/Nb	0,83	0,77	0,71	0,74	0,79
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0,70355 ± 8	0,70378 ± 10	0,70345 ± 8	0,70386 ± 9	0,70394 ± 8
⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	0,01754	0,02187	0,00123	0,00739	0,14493
(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _t	0,70353	0,70375	0,70345	0,70386	0,70374
(ε _{Sr}) _t	−12,04	−9,01	−13,3	−7,5	−9,12
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	0,51301 ± 6	0,51301 ± 6	0,51298 ± 6	0,51300 ± 6	0,51303 ± 6
¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	0,14611	0,15004	0,12818	0,17059	0,1488
(¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd) _i	0,51129	0,51292	0,51290	0,51290	0,51296
(ε _{Nd}) _i	+7,9	+8	+7,7	+7,6	+8,8

sociation amphibole–plagioclase–quartz nous permet d'utiliser l'étalonnage de [8], basé sur la réaction édenite + quartz = trémolite + albite [16]. Ce thermomètre est construit sur la teneur en aluminium tétraédrique des amphiboles calciques et la teneur en albite du plagioclase à l'équilibre avec l'amphibole. La présence à l'équilibre de l'orthopyroxène et du clinopyroxène nous permet également d'estimer la température. Nous avons pour cela utilisé le logiciel de multi-équilibres TWQ2.02 [4,5], modèle de solutions solides de [7] pour l'orthopyroxène et de [6] pour le clinopyroxène. Nos résultats indiquent des températures d'équilibre situées entre 800 et 850 °C pour la granulite (éch. 12). Les températures évaluées sur les couples amphibole–plagioclase (éch. 6) donnent des résultats compatibles.

L'absence de grenat ne nous permet pas d'utiliser de baromètre pour étalonner la pression. Toutefois, en considérant des compositions variées de métabasites, l'absence du grenat est un bon indice de pressions modérées, inférieures à 6–9 kbar (~ 20 – 25 km d'enfouissement) pour 800 °C [14,29,32].

Nos données préliminaires montrent donc qu'au Miocène, un gradient thermique élevé (~ 40 °C km⁻¹) existait sous l'arc volcanique. Si l'on tient compte de l'épaisseur actuelle (50–70 km) de la racine crustale des Andes d'Équateur [15], on peut supposer qu'à partir du Miocène *p.p.*, l'épaisseur de la racine était suffisante pour que le matériel océanique des parties profondes de la racine ait subi une re-mobilisation, voire une fusion partielle, et ait donc contribué au magmatisme d'arc.

5. Conclusions

Une faille majeure miocène, recoupant les terrains océaniques accrétés de la cordillère occidentale d'Équateur, a exhumé des roches magmatiques et des métabasites. L'analyse pétrographique, minéralogique et géochimique de cinq d'entre elles montre que ces roches appartiennent toutes aux plateaux océaniques créacés accrétés entre ~ 80 et 40 Ma, et qui forment donc bien la racine actuelle de la cordillère occidentale. En particulier, les ε_{Nd} de toutes ces roches sont homogènes et compris entre +7 et +8.

L'étude thermobarométrique d'une amphibolite et d'une granulite indique un métamorphisme à tempéra-

ture supérieure ou égale à 800 °, pour des pressions relativement faibles, inférieures à 6–9 kbar (20–25 km). Ces résultats montrent l'existence, au Miocène, d'un gradient géothermique très élevé, lié à l'activité de l'arc magmatique qui s'installe à la fin de l'Éocène sur les terrains océaniques accrétés.

Ces résultats permettent d'envisager qu'une partie du matériel océanique accrété, présent en profondeur sous l'arc magmatique, a pu être re-mobilisé et contribuer à la genèse du magmatisme néogène de marge active de l'Équateur.

Remerciements

Ces résultats ont été obtenus grâce à un financement de l'IRD (UR 154, LMTG, Toulouse) et du laboratoire de géodynamique des chaînes alpines (LGCA, Grenoble), UMR CNRS–UJF 5025. Nous remercions les deux lecteurs anonymes, dont les suggestions ont contribué à l'amélioration de ce manuscrit.

Références

- [1] P. Baby, P. Rochat, G.-H. Mascle, G. Hérail, Neogene shortening contribution to crustal thickening in the back arc of the Central Andes, *Geology* 25 (1997) 883–886.
- [2] R. Barragán, D. Geist, M. Hall, P. Larson, M. Kurz, Subduction control on the compositions of lavas from the Ecuadorian Andes, *Earth Planet. Sci. Lett.* 154 (1998) 153–199.
- [3] J.A. Barrat, F. Keller, J. Amossé, Determination of rare earth elements in sixteen silicate reference samples by ICP–MS after Tm addition and ion exchange separation, *Geostandards Newslett.* 20 (1996) 133–139.
- [4] R.G. Berman, Internally consistent thermodynamic data for minerals in the system Na₂O–MgO–FeO–Fe₂O₃–Al₂O₃–SiO₂–TiO₂–H₂O–CO₂, *J. Petrol.* 29 (1988) 445–522.
- [5] R.G. Berman, Thermobarometry using multiequilibrium calculations: a new technique with petrologic applications, *Can. Mineral.* 29 (1991) 833–855.
- [6] R.G. Berman, L.Ya. Aranovitch, Optimized standard state and solution properties of minerals. I. Model calibration for olivine, orthopyroxene, cordierite, garnet and ilmenite in the system FeO–MgO–CaO–Al₂O₃–TiO₂–SiO₂, *Contrib. Mineral. Petrol.* 126 (1996) 1–24.
- [7] R.G. Berman, L.Ya. Aranovitch, D.R.M. Pattison, Reassessment of the garnet-clinopyroxene Fe–Mg exchange thermometer: II. Thermodynamic analysis, *Contrib. Mineral. Petrol.* 119 (1995) 30–42.
- [8] J.D. Blundy, T.J.B. Holland, Calcic amphibole equilibria and a new amphibole–plagioclase geothermometer, *Contrib. Mineral. Petrol.* 104 (1990) 208–224.

- [9] E. Bourdon, J.-P. Eissen, M.-A. Gutscher, M. Monzier, M.-L. Hall, J. Cotten, Magmatic response to early aseismic ridge subduction: the Ecuadorian margin case (South America), *Earth Planet. Sci. Lett.* 205 (2003) 123–138.
- [10] D. De Waard, The occurrence of garnet in the granulite-facies terrane of the Adirondack Highlands, *J. Petrol.* 6 (1965) 91–165.
- [11] A. Egüez, Évolution cénozoïque de la cordillère occidentale septentrionale d'Équateur (0°15'S–1°10'S) : les minéralisations associées, thèse, université Paris-6, 1986, 116 p.
- [12] A. Gansser, Facts and theories on the Andes, *J. Geol. Soc. Lond.* 129 (1973) 93–131.
- [13] P. Giese, E. Scheuber, F. Schilling, M. Schmitz, P. Wigger, Crustal thickening processes in the Central Andes and the different natures of the Moho-discontinuity, *J. South Am. Earth Sci.* 12 (1999) 201–220.
- [14] D.H. Green, A.E. Ringwood, An experimental investigation of the gabbro to eclogite transformation and its petrological application, *Geochim. Cosmochim. Acta* 31 (1967) 767–833.
- [15] B. Guillier, J.-L. Châtelain, E. Jaillard, H. Yepes, G. Poupinet, J.-F. Fels, Seismological evidence on the geometry of the orogenic system in Central-Northern Ecuador (South America), *Geophys. Res. Lett.* 28 (2001) 3749–3752.
- [16] T.J.B. Holland, J.D. Blundy, Non ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphiboles-plagioclase thermometry, *Contrib. Mineral. Petrol.* 116 (1994) 443–447.
- [17] R.A. Hughes, L.F. Pilatasig, Cretaceous and Tertiary terrane accretion in the Cordillera Occidental of the Andes of Ecuador, *Tectonophysics* 345 (2002) 29–48.
- [18] E. Jaillard, G. Hérial, T. Monfret, E. Díaz-Martínez, P. Baby, A. Lavenu, J.-F. Dumont, Tectonic evolution of the Andes of Ecuador, Peru, Bolivia and northernmost Chile, in : U.G. Cordani, et al. (Eds.), *Tectonic evolution of South America*, Publ. 31st Int. Geol. Cong. Rio de Janeiro, 2000, pp. 481–559.
- [19] E. Jaillard, G. Hérial, T. Monfret, G. Wörner, Andean geodynamics: main issues and contributions from the 4th ISAG, Göttingen, *Tectonophysics* 242 (2002) 1–15.
- [20] E. Jaillard, M. Ordoñez, J. Suárez, J. Toro, D. Iza, W. Lugo, Stratigraphy of the Late Cretaceous–Palaeogene deposits of the Western Cordillera of Central Ecuador: geodynamic implications, *J. South Am. Earth Sci.* 17 (2004) 49–58.
- [21] W. Kehrler, G. Van der Kaaden, Notes on the geology of Ecuador with special reference to the Western Cordillera, *Geol. Jahrb. B* 35 (1979) 5–57.
- [22] A.C. Kerr, G.F. Marriner, J. Tarney, A. Nivia, A.D. Saunders, M.F. Thirlwall, C.W. Sinton, Cretaceous basaltic terranes in Western Colombia: elemental, chronological and Sr–Nd isotopic constraints on petrogenesis, *J. Petrol.* 38 (1997) 677–702.
- [23] A.C. Kerr, J.A. Aspden, J. Tarney, L.F. Pilatasig, The nature and provenance of accreted terranes in Western Ecuador: geochemical and tectonic constraints, *J. Geol. Soc. Lond.* 159 (2002) 577–594.
- [24] H. Lapierre, D. Bosch, V. Dupuis, M. Polvé, R.C. Maury, J. Hernandez, P. Monié, D. Yéghicheyan, E. Jaillard, M. Tardy, B. Mercier de Lépinay, M. Mamberti, A. Desmet, F. Keller, F. Sénebier, Multiple plume events in the genesis of the peri-Caribbean Cretaceous oceanic plateau province, *J. Geophys. Res.* 105 (2000) 8403–8421.
- [25] B.E. Leake, A.R. Woolley, C.E.S. Arps, M.D. Birch, M.C. Gilbert, J.D. Grice, F.C. Hawthorne, A. Kato, H.J. Kisch, V.G. Krivovichev, K. Linthout, J. Laird, J.A. Mandarino, W.V. Maresch, E.H. Nickel, N.M.S. Rock, J.C. Schumacher, D.C. Smith, N.C.N. Stephenson, L. Ungaretti, E.J.W. Whittaker, Y. Guo, Nomenclature of amphiboles; report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names, *Can. Mineral.* 35 (1997) 219–246.
- [26] M. Lebrat, F. Megard, C. Dupuy, J. Dostal, Geochemistry and tectonic setting of pre-collision Cretaceous and Paleogene volcanic rocks of Ecuador, *Geol. Soc. Am. Bull.* 99 (1987) 569–578.
- [27] M. Mamberti, H. Lapierre, D. Bosch, E. Jaillard, J. Hernandez, M. Polvé, The Early Cretaceous San Juan plutonic suite, Ecuador: a magma chamber in an Oceanic Plateau, *Can. J. Earth Sci.* 41 (2004) 1237–1258.
- [28] W.J. McCourt, P. Duque, L.F. Pilatasig, R. Villagómez, Mapa geológico de la Cordillera Occidental del Ecuador entre 1°–2°S, escala 1/200 000, CODIGEM-Min. Energ. Min.-BGS publs., Quito, 1998.
- [29] C. Nicollet, *Métabasites, granulites, anorthosites et roches associées de la croûte inférieure*, thèse, université de Clermont-Ferrand, 1988, 315 p.
- [30] E. Pourtier, *Pétrologie et géochimie des unités magmatiques de la côte équatorienne : implications géodynamiques*, Mém. DEA, université Grenoble-1, 2001, 35 p.
- [31] C. Reynaud, E. Jaillard, H. Lapierre, M. Mamberti, G.-H. Mascle, Oceanic plateau and island arcs of Southwestern Ecuador: their place in the geodynamic evolution of northwestern South America, *Tectonophysics* 307 (1999) 235–254.
- [32] F.S. Spear, An experimental study of hornblende stability and compositional variability in amphibolite, *Am. J. Sci.* 281 (1981) 697–734.
- [33] G. Suárez, P. Molnar, B.C. Burchfield, Seismicity, fault-plane solutions, depth of faulting, and active tectonics of the Andes of Peru, Ecuador and Southern Colombia, *J. Geophys. Res.* 88 (1983) 10403–10428.
- [34] S.S. Sun, W.F. McDonough, Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes, in : A.D. Saunders, M.J. Norry (Eds.), *Magma-tism in Ocean Basins*, *Geol. Soc. Lond., Spec. Publ.* 42 (1989) 313–343.