

Datation K-Ar et $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ à 65 ± 3 Ma des gisements d'émeraude du district de Chivor-Macanal : argument en faveur d'une déformation précoce dans la Cordillère orientale de Colombie

Alain Cheilletz, Gaston Giuliani, Yannick Branquet, Bernard Laumonier, Antonio José Sanchez M., Gilbert Féraud et Thierry Arhan

C.R. Acad. Sci. Paris,
t. 324, série II a,
p. 369 à 377,
1997

Résumé La genèse des gisements d'émeraude de Colombie, du district de Chivor-Macanal, dans la Cordillère orientale, est associée à un épisode tectonique daté à 65 ± 3 Ma par K-Ar et $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$.

Mots clés : Émeraude, Colombie, K-Ar, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, Décollement, Limite Crétacé-Tertiaire.

Abstract K-Ar and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating at 65 Ma of the Chivor-Macanal emerald deposits: evidence for an early tectonic event in the Eastern Cordillera of Colombia

The genesis of Colombian emerald deposits of the Chivor-Macanal district is related to a tectonic event dated at 65 ± 3 Ma by K-Ar and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$.

Keywords: Emerald, Colombia, K-Ar, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, Decollement, Cretaceous-Tertiary boundary

A. C., G. G., Y. B. et T. A.* : CRPG-CNRS,
BP 20, 54501, Vandœuvre-lès-Nancy
cedex.

G. G. : Orstom, 213, rue La Fayette,
75009 Paris.

B. L. : École des mines de Nancy, 54042
Nancy cedex, France.

A. J. S. M. : Mineralco SA, A.A. 17521,
Bogota, Colombie.

G. F. : UMR géoscience Azur, EP 125
CNRS, parc Valrose, 06108, Nice cedex,
France.

* Adresse actuelle : Ardoisières
d'Angers, 3, rue Carl-Liuné, BP 08,
49010, Angers cedex 01, France.

**Abridged
English
Version**

THE Colombian emerald deposits are hosted by the Early Cretaceous black shales west and east of the Eastern Cordillera (fig. 1). Their hydrothermal-sedimentary origin has been demonstrated (Cheilletz and Giuliani, 1996). In the western Muzo-Coscuez deposits, dated at the Eocene-Oligocene boundary (38-32 Ma, Cheilletz *et al.*, 1994), the mineralization is controlled by folds and thrust planes marked by hydrothermal tectonic breccia (HTB), metasomatic layers (albitites) and carbonate vein sets (Laumonier *et al.*, 1996). Reported here are the K-Ar and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dates of the Chivor-Macanal deposits in the eastern zone. The Eastern Cordillera of Colombia derived from a back-arc basin of Triassic to Late-Cretaceous age inverted since the Middle Miocene, provoked the thrusting of the two fronts of the chain with opposite transport directions (Cooper *et al.*, 1995). On a regional scale, the

main structures are folds in the NNE-SSW direction as the chain itself. In the study area, Palaeozoic schists and quartzites (Quetame-Farallones groups) represent the basement of the Early Cretaceous cover beginning with Berriasian conglomerate sandstone and limestone, Valanginian black shales (Macanal Formation; 2 900 m) and Hauterivian shale-sandstone (Ulloa and Rodriguez, 1976).

GEOLOGICAL SETTING AND AGE OF THE MINERALIZATION

The emerald deposits are stratiform and hosted within the lowermost 500 m of the Macanal formation (fig. 1). Three main rock-types are spatially associated with the mineralization: (1) *Stratiform albitites*. These are massive, whitish banded rocks showing the same bedding as black shales (fig. 2a). They represent metasomatized black shale horizons with growth of epigenetic albite, calcite, dolomite,

Note

présentée par
Jean-Paul Poirier.

remise le 25 juillet 1996,
acceptée après révision
le 14 octobre 1996.

Fonds Documentaire ORSTOM

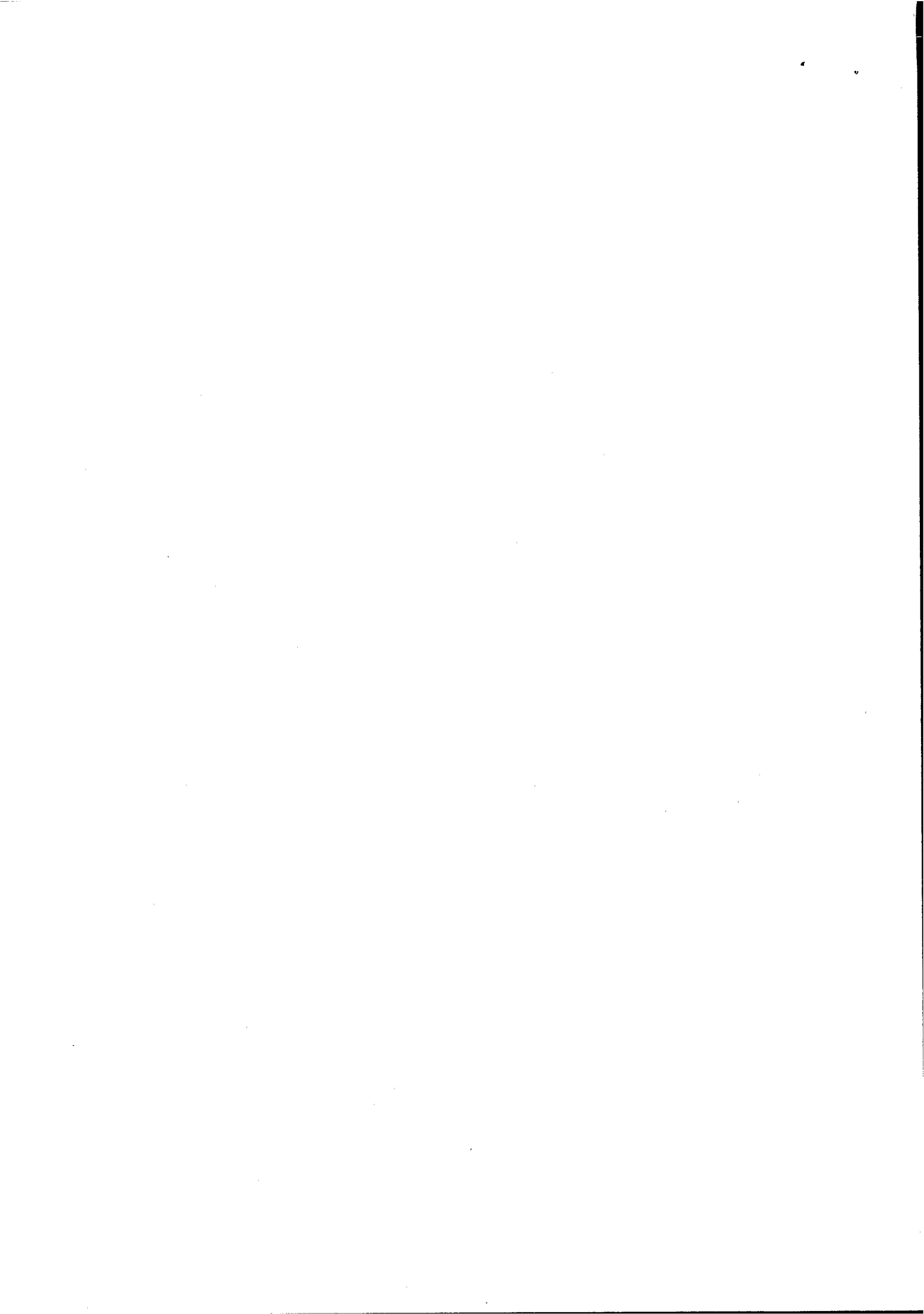


010018401

1250-8050/96/03230369 • © Académie des sciences/Elsevier, Paris
Fonds Documentaire ORSTOM

Cote : B* 18401 EX 1

369



pyrite, micas and quartz. (2) *Hydrothermal tectonic breccias* (HTB). These are crumbly polygenic breccias composed of fragments of black shale and albitites cemented by pyrite, albite, carbonates and powdered black shale and albitites (fig. 2b). They lie generally parallel to the bedding and close to the stratiform albitites; they have a thickness varying from 10 cm to 10 m. They contain pockets with emerald deposits. (3) *Veins*. They can be grouped into arrays, whose density increases near the HTB. Well-ordered sets are composed of tension gashes; disordered sets result from hydraulic fracturation under high fluid pressure. Stage 1 veins are barren and composed mainly of fibrous calcite infilling the veins (fig. 2c); stage 2 veins are characterized by precipitation of rhombohedral calcite and dolomite, pyrite, quartz, albite, muscovite, fluorite and emerald. Tension gashes show either one or both infilling stages, whereas disordered sets belong to the second stage. Muscovites from stage 2 veins in the deposits of Porvenir, Klein, San Gregorio and Agua Blanca, have been dated by K-Ar and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ according to the analytical procedure described in Cheilletz *et al.* (1994). X-ray and electron microprobe analysis of muscovite (table I) demonstrates a Mg-phengite composition ($0.11 < \text{Mg} < 0.16$). Variable K-content ($8.13\% < \text{K}_2\text{O} < 9.80\%$) and H_2O content ($4.3\% < \text{H}_2\text{O} < 8\%$) favour an intimate mixture of muscovite and minor amounts of illite. The two samples from Porvenir and Agua Blanca show the most regular $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ spectra giving plateau ages of 65.0 ± 1.9 Ma and 65.2 ± 1.4 Ma respectively (table IIa and fig. 3a). Possible recoil effects due to the muscovite-illite interlayering have

been evaluated by K-Ar dating. The K-Ar ages (67.4 ± 2.4 Ma for Porvenir and 62.6 ± 1.5 Ma for Agua Blanca; table IIb) are within the error of the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ plateau ages. A 64.8 ± 3.1 Ma weighted mean age has been calculated considering the K-Ar and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages obtained on the Porvenir, San Gregorio and Agua Blanca muscovites (fig. 4). We interpret the age of 65 ± 3 Ma to represent the age of formation of the eastern emerald deposits. The analysis performed on the Klein samples (table IIa and fig. 3b) showed more disturbed spectra with no distinct plateau; the integrated $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages (63-75 Ma) are, however, in agreement with the K-Ar ages (67-76 Ma).

CONCLUSION AND DISCUSSION

The age of four deposits in the Chivor-Macanal district is 65 ± 3 Ma, i.e. the Cretaceous-Tertiary boundary. As the formation of the Colombian emerald deposits is related to a horizontal decollement episode synchronous with the hydrothermalism that created metasomatized horizons (albitites), HTB and vein arrays (Cheilletz and Giuliani, 1996), this age dates an important tectonic episode. The 30 Ma age difference between the two Colombian emerald zones is significant. It might reflect palaeogeographic and tectonic conditions exerted on the Eastern Cordillera basin since Late-Cretaceous times, i.e.: (1) the existence of two distinct sub-basins that correspond to the two emerald zones – the Cocuy and Tablazo-Magdalena basins – separated by the Santander high, and (2) the oblique convergence of the Nazca and South American plates.

INTRODUCTION

Les gisements d'émeraude de Colombie sont encaissés dans les lutites noires du Crétacé inférieur de la Cordillère orientale, où ils affleurent en deux zones parallèles aux bordures de cette chaîne, la zone orientale et la zone occidentale (fig. 1). L'origine sédimentaire-hydrothermale et non magma-

tique des émeraudes de Colombie a été démontrée (Cheilletz et Giuliani, 1996). En outre, un modèle tectonique original a été récemment présenté pour les deux plus importants gisements de la zone occidentale, Muzo et Coscuez (Laumonier *et al.*, 1996), qui associe l'hydrothermalisme à l'origine de la minéralisation à une phase tectonique compressive. En effet, dans ces gisements, les mi-

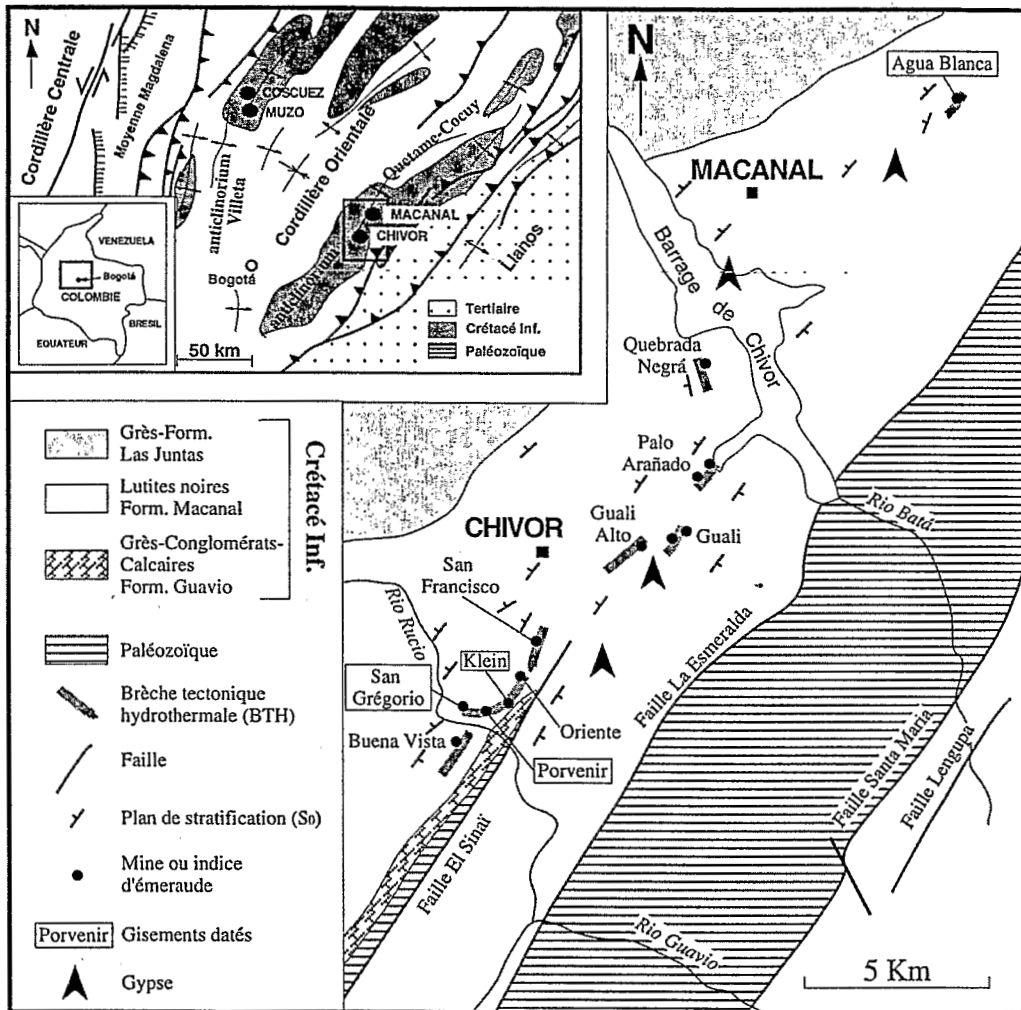


Fig. 1 Cadre structural des gisements d'émeraude du district de Chivor-Macanal, d'après Ulloa et Rodriguez (1976), modifié. En encart : carte structurale simplifiée de la Cordillère orientale.

Structural framework of the Chivor-Macanal emerald deposits, from Ulloa and Rodriguez (1976) modified. Inset: structural sketch map of Eastern Cordillera.

néralisations sont contrôlées par des plans de décollement caractérisés par une bréchification intense, une métasomatose albitique et le remplissage des veines associées par la calcite et/ou la dolomite. La formation de ces gisements est datée par les méthodes K-Ar et $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de la limite Éocène-Oligocène (38-32 Ma, Cheilletz *et al.*, 1994) sur des muscovites vertes synchrones du dépôt de l'émeraude. Nous présentons ici le résultat des datations K-Ar et $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ acquises sur les gisements du district de Chivor-Macanal, dans la zone orientale.

CADRE GÉOLOGIQUE ET STRUCTURAL

La Cordillère orientale de Colombie, de direction structurale majeure NNE-SSW, résulte de l'inversion tectonique d'un vaste bassin sédimentaire marin de type arrière-arc, triasique à fini-crétacé, dont le comblement s'achève au Paléogène par des molasses continentales. L'inversion tectonique, responsable des deux zones majeures de chevauchement à vergence opposée, qui limitent et soulèvent la Cordillère orientale, s'est produite durant les phases andines, à partir du Miocène moyen (Cooper *et al.*, 1995). Lors de cette inversion, les ancien-

Fig. 2. a. Lutite noire albitisée ; on note la coloration claire de l'échantillon, ainsi que la parfaite préservation des structures sédimentaires, telles que stratification et microfaille synsédimentaire (flèches) (mine d'Oriente). **b.** Structure interne de la brèche tectonique hydrothermale BTH (mine d'Oriente) ; la brèche reprend ici des éléments clairs de l'albite du toit. **c.** Veine de calcite rhomboédrique du stade 2, recoupant une veine à calcite fibreuse du stade 1, à croissance antiaxiale (mine de Porvenir).

a. Albitized black shale; note the clear colour of the sample and the preservation of sedimentary structures as bedding and synsedimentary microfaults (arrows); Oriente mine. b. Internal structure of the hydrothermal tectonic breccia HTB (Oriente mine); the breccia remobilizes clear fragments from the hanging wall albite. c. Stage 2 rhomboedric calcite vein cutting fibrous calcite vein of stage 1; note that the stage 1 is an antitaxial vein (Porvenir mine).

nes failles normales ont été réactivées en failles inverses, provoquant le chevauchement de la couverture vers l'ouest, sur le bassin du Rio Magdalena et vers l'est sur le bassin d'avant-pays des Llanos (fig. 1).

Les gisements faisant l'objet de cette étude sont situés dans la zone orientale, sur l'anticlinorium de Quetame-Cocuy (fig. 1). Deux importants massifs de schistes et quartzites, attribués aux groupes Quetame et Farallones (Paléozoïque), constituent le socle, souvent en contact par faille (failles Santa Maria, La Esmeralda, El Sinai) avec la couverture. Selon Ulloa et Rodriguez (1976), la série du Crétacé inférieur est constituée, de la base au sommet, de conglomérats, grès et calcaires berriasiens de la formation Guavio, puis en continuité stratigraphique apparente, de lutites noires valanginiennes de la formation Macanal (2 900 m d'épaisseur) et enfin, d'alternances de lutites et de grès hauteriviens de la formation Las Juntas.

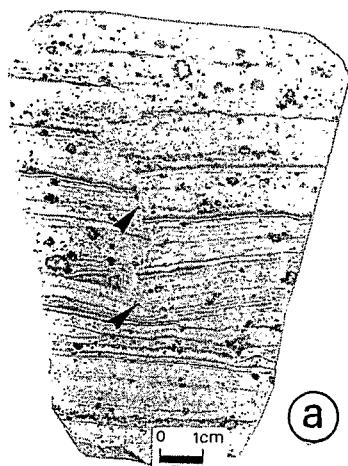
Les gisements et indices étudiés sont encaissés dans les 500 premiers mètres de la formation Macanal, sur un axe NNE-SSW parallèle (1) à la direction structurale majeure de la cordillère, (2) aux écailles de Paléozoïque et (3) aux principales failles régionales (fig. 1). De manière générale, les gisements d'émeraude ont une géométrie stratiforme légèrement pentée vers le nord-ouest. Dans le détail, la minéralisation d'émeraude est associée à trois types de roches.

Les albitites stratiformes

Il s'agit de roches blanches, massives et rubanées, qui présentent le même litage que les lutites noires (bancs réguliers de 5 à 10 cm d'épaisseur ; fig. 2a), dans lesquelles elles s'intercalent en niveaux de 10 à 15 m d'épaisseur ; un niveau principal a été reconnu dans les mines de San Francisco et Oriente et deux niveaux dans la mine de Klein ; ces roches se composent d'albite (25 à 90 % en volume), calcite et/ou dolomite (5 à 55 %), micas (1 à 10 %), quartz (1 à 20 %) et pyrite (1 à 15 %) ; le rapport albite/calcite présente de fortes variations dans les différents échantillons ; l'examen microscopique des albitites montre la croissance épigénétique de grains d'albite très fine (< 10 µm) et de calcite sparitique dans la matrice des lutites noires ; il s'agit donc d'horizons de lutites noires métasomatés par des saumures chlorurées riches en Na et Ca.

Les brèches tectoniques hydrothermales (BTH)

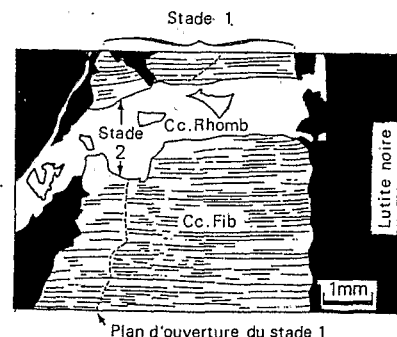
Elles affleurent dans tous les gisements et indices visités (fig. 1), souvent au contact des albitites, en un ou plusieurs niveaux irréguliers stratiformes qui matérialisent des plans de faille conformes à la stratification ; ces brèches polygéniques (fig. 2b) sont constituées de fragments de lutites noires et d'albitites ; ces éléments, de taille très irrégulière et sans granoclassement, sont dispersés dans une matrice fine constituée de pyrite, calcite, albite, ainsi que de lutite noire et d'albite broyées (fig. 2b) ; les



a



b



c

BTH présentent une puissance très irrégulière de 10 cm à une dizaine de mètres ; des cavités géodiques contenant parfois des émeraudes y sont dispersées sporadiquement.

Les veines

Elles se présentent en réseaux organisés ou désordonnés, leur densité augmentant toujours à l'approche des BTH, qui apparaissent donc comme zone d'alimentation en fluides hydrothermaux ; les réseaux organisés se composent de fentes de tension sigmoïdes ou rectilignes, agencées ou non en échelon ; parmi ces réseaux organisés, les veines parallèles à SO représentent la famille la plus développée ; les réseaux désordonnés, par la morphologie et les directions aléatoires de leurs veines, résultent d'une fracturation hydraulique sous forte pression fluide ; ce même mécanisme génère également les cavités géodiques à remplissage hydrothermal ; deux types de remplissage correspondant à deux stades d'ouverture successifs sont distingués (fig. 2c) ; le stade 1, stérile, est caractérisé par un remplissage de calcite en fibres perpendiculaires aux épontes ; le stade 2, épisode minéralisateur, possède une paragenèse à calcite et dolomite rhomboédriques, pyrite, quartz, albite, muscovite, fluorite et émeraude ; les fentes de tension des réseaux organisés présentent les deux types de remplissage, seuls ou combinés, lors de la réouverture d'une veine de stade 1 par le stade 2 ; les réseaux désordonnés montrent uniquement la paragenèse du stade 2.

DATATIONS K-Ar et $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$

Quatre échantillons de muscovite des épontes de veines du stade 2 provenant des mines de Chivor (chantiers de Porvenir, Klein et San Gregorio) et de l'indice d'Agua Blanca (fig. 1) ont été utilisés pour déterminer l'âge des minéralisations d'émeraude et des structures associées. Les échantillons sélectionnés apparaissent homogènes à l'analyse optique et sont tous constitués de phases hydrothermales précipitées dans les veines, sans contamination par l'encaissant. L'analyse aux rayons X révèle des réseaux de type muscovite $2M_1$, avec pour l'échantillon de Klein, une différence de cristallinité au niveau des plans (hkl), signe d'un léger désordre de la structure. L'analyse chimique par microsonde électronique des quatre échantillons révèle

des compositions similaires (tableau I), de type phengites magnésiennes ($0,11 < \text{Mg} < 0,16$), caractérisées par un déficit du remplissage interfoliaire ($1,52 < X < 1,80$) compensé par un enrichissement en Si tétraédrique ($6,26 < \text{Si} < 6,31$) et des teneurs en H_2O variables ($4,3 \% < \text{H}_2\text{O} < 8 \%$). Les teneurs en K_2O des échantillons de Porvenir et Agua Blanca sont variables et plutôt basses ($8,13 \% < \text{K}_2\text{O} < 9,37 \%$), alors qu'elles approchent des valeurs théoriques de la muscovite pour les échantillons de San Gregorio et Klein (9,8 % et 9,78 % respectivement). La charge relativement faible en K_2O des autres échantillons peut s'expliquer, à l'image des muscovites analysées dans les gisements de Coscuez et Muzo (Cheilletz *et al.*, 1994), par une légère contamination par de l'illite. Enfin, on observe une bonne concordance des teneurs en K_2O mesurées par microsonde électronique (tableau I) avec celles mesurées par absorption atomique (tableau IIb), ce qui permet de valider les mesures de composition effectuées à la microsonde électronique.

Le protocole analytique est le même que celui utilisé pour l'étude des minéralisations de la bordure occidentale (Cheilletz *et al.*, 1994). Les analyses sont effectuées sur population (K-Ar) et sur monograin, par sonde laser ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$). Les deux échantillons de Porvenir et Agua Blanca présentent les spectres d'âge $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ les plus réguliers (fig. 3a) ; après un début relativement perturbé (10 % du total de l'argon extrait), des spectres plats permettent de calculer deux âges plateaux, l'un à $65,2 \pm 1,4$ Ma sur six étapes de l'échantillon d'Agua Blanca, l'autre à $65,0 \pm 1,9$ Ma sur deux étapes de l'échantillon de Porvenir (tableau IIa). L'effet de recul qui pourrait provenir des interstratifications muscovite-illite a été testé au moyen d'analyses complémentaires K-Ar (tableau IIb). Les âges obtenus ($67,4 \pm 2,4$ Ma pour Porvenir et $62,6 \pm 1,5$ Ma pour Agua Blanca) sont équivalents, aux marges d'erreur près, aux âges intégrés obtenus par $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ sur monograins. L'échantillon de San Gregorio a fourni un âge K-Ar de $68,0 \pm 1$ Ma (tableau IIb). Trois analyses $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ effectuées sur monocristaux de trois aliquotes du même échantillon

Tableau I Composition (K₂O %; total %) et formules structurales calculées à partir des analyses microsonde (université Nancy I, service commun d'analyse) des muscovites des gisements de Porvenir, Agua Blanca, San Gregorio et Klein.

Composition (K₂O %; total %) and chemical formula deduced from microprobe analysis of muscovites from Porvenir, Agua Blanca, San Gregorio and Klein mines.

| Échantillon | Porvenir | | Agua Blanca | | San Gregorio | Klein |
|-------------------|----------|-------|-------------|-------|--------------|-------|
| | POR-5 | POR-5 | A-3 | A-3 | SG 44 | |
| Analyse | 5 | 8 | 47 | 51 | 15 | 29 |
| K ₂ O% | 9,37 | 8,13 | 9,24 | 9,13 | 9,8 | 9,78 |
| Total% | 95,7 | 92,03 | 95 | 93,9 | 95,14 | 94,26 |
| Si ⁴⁺ | 6,256 | 6,313 | 6,288 | 6,267 | 6,272 | 6,296 |
| Al ^{IV} | 1,744 | 1,687 | 1,712 | 1,733 | 1,728 | 1,704 |
| Z | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Al ^{VI} | 3,840 | 3,887 | 3,857 | 3,871 | 3,813 | 3,802 |
| Ti ⁴⁺ | 0,017 | 0,022 | 0,008 | 0,013 | 0,019 | 0,024 |
| V ⁵⁺ | 0,02 | 0,001 | 0,022 | 0,001 | 0,026 | 0,002 |
| Cr ³⁺ | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| Fe ²⁺ | 0,047 | 0,045 | 0,043 | 0,038 | 0,020 | 0,032 |
| Mn ²⁺ | 0,001 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,01 |
| Mg ²⁺ | 0,112 | 0,142 | 0,152 | 0,150 | 0,156 | 0,156 |
| Ni ²⁺ | 0,001 | 0,004 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| Y | 4,04 | 4,10 | 4,08 | 4,07 | 4,03 | 4,03 |
| Ca ⁺⁺ | 0,001 | 0,027 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| Na ⁺ | 0,213 | 0,096 | 0,101 | 0,141 | 0,132 | 0,139 |
| K ⁺ | 1,562 | 1,397 | 1,548 | 1,548 | 1,647 | 1,66 |
| X | 1,78 | 1,52 | 1,65 | 1,69 | 1,78 | 1,80 |

Fig. 3 a et b Spectres d'âges ⁴⁰Ar/³⁹Ar sur muscovite (analyses UMR géoscience Azur).

⁴⁰Ar/³⁹Ar age spectra of muscovite (UMR Géoscience Azur analyses).

de Klein révèlent des spectres très perturbés (fig. 3b), sans âge plateau (tableau IIa). Pour les trois analyses, les âges intégrés varient entre 63 et 75 Ma, reflétant une mauvaise reproductibilité analytique pour cet échantillon. Deux âges K-Ar assez éloignés à 66,9 ± 2,4 Ma, l'autre à 76,0 ± 2,4 Ma (tableau IIb) ont été

obtenus pour deux aliquotes distinctes de ce même échantillon, ce qui confirme la mauvaise reproductibilité des analyses. Ces âges K-Ar se situent néanmoins dans l'intervalle d'âges déterminé par ⁴⁰Ar/³⁹Ar. Du fait de leur comportement distinct, les résultats fournis par les échantillons de Klein ont été écar-

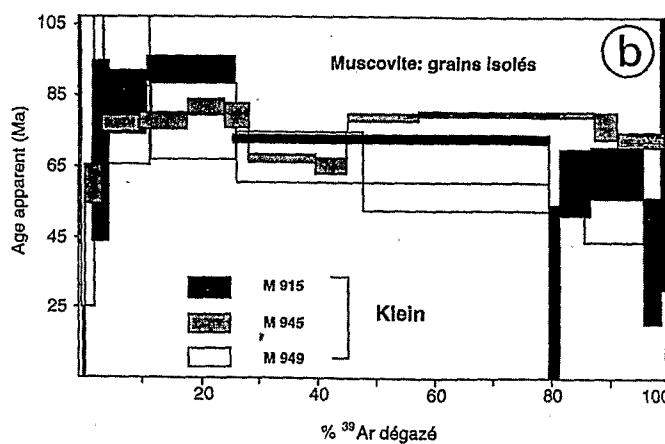
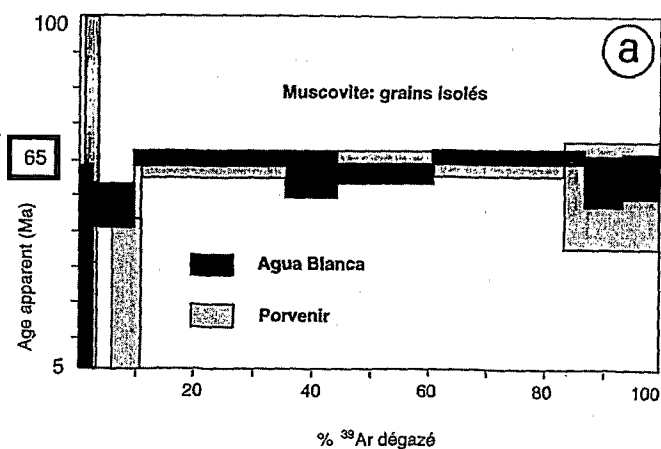


Tableau IIa Récapitulatif des mesures $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ et calculs d'âges ; le moniteur utilisé est HB3GR (1070 Ma) sur le réacteur Mc Master University (Canada).

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ data and age calculation; HB3GR (1070 Ma) monitor on the Mac Master University reactor (Canada).

| Échantillon | Nombre d'étapes | Age intégré Ma \pm 1s | Age plateau Ma \pm 1s |
|--------------------|-----------------|----------------------------|------------------------------|
| Porvenir POR-5 | 6 | 58,4 \pm 5,3 | 65,0 \pm 1,9 Étapes 5-6 |
| Agua Blanca A-3 | 9 | 63,3 \pm 1,5 | 65,2 \pm 1,4 Étapes 4-9 |
| Klein M915 | 13 | 70,6 1,7 | pas de plateau |
| Klein M945 | 12 | 74,7 \pm 0,6 | pas de plateau |
| Klein M949 | 9 | 62,5 \pm 3,9 | pas de plateau |

Tableau IIb Mesures et âges K-Ar (analyses CRPG-CNRS, Vandœuvre ; K_2O analysé par absorption atomique). Les aliquotes Klein 1 et 2 ainsi que les grains isolés Klein M915, M945 et M949 proviennent du même échantillon.

K-Ar data and ages (CRPG-CNRS analyses, Vandœuvre; K_2O analysed by atomic absorption). The Klein 1 and 2 aliquots and the single grains M915, M945, M949 belong to the same sample.

| Échantillon | K_2O % | ^{40}Ar rad. (10^{-6} cm ³ /g) | ^{40}Ar atm. (%) | Age (Ma \pm 1s) |
|-----------------------|------------------------|--|------------------------------|----------------------|
| Porvenir POR-5 | 8,96 | 19,88 | 21,4 | 67,4 \pm 2,4 |
| Agua Blanca A-3 | 9,06 | 18,6 | 21,4 | 62,6 \pm 1,5 |
| San Gregorio SG 44 | 9,97 | 22,13 | 2,8 | 68,0 \pm 1 |
| Klein 1 | 9,63 | 21,2 | 18,9 | 66,9 \pm 2,4 |
| Klein 2 | 9,34 | 23,36 | 16,5 | 76,0 \pm 2,4 |

tés de l'estimation de l'âge des muscovites des gisements de la zone orientale. Sur le graphique de la figure 4, les échantillons de Porvenir, San Gregorio et Agua Blanca sont caractérisés par un étalement des âges K-Ar et $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ entre 61 et 70 Ma, marge d'erreur comprise. En outre, on observe une bonne reproductibilité des résultats, à l'intérieur des marges d'erreur, pour les échantillons de Porvenir et Agua Blanca analysés à la fois par K-Ar et $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$. Enfin, les échantillons de Porve-

nir et Agua Blanca présentent deux âges plateaux $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ concordants à 65,0 \pm 1,9 Ma et 65,2 \pm 1,4 Ma respectivement ; les âges K-Ar et $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ sur les trois échantillons se dispersent autour d'une valeur moyenne pondérée calculée à 64,8 \pm 3,1 Ma (fig. 4). Il paraît donc justifié de retenir l'âge de 65 \pm 3 Ma comme représentant l'âge de cristallisation de la muscovite des veines à émeraude des gisements de la bande orientale. Cet âge correspond à la limite Crétacé-Tertiaire.

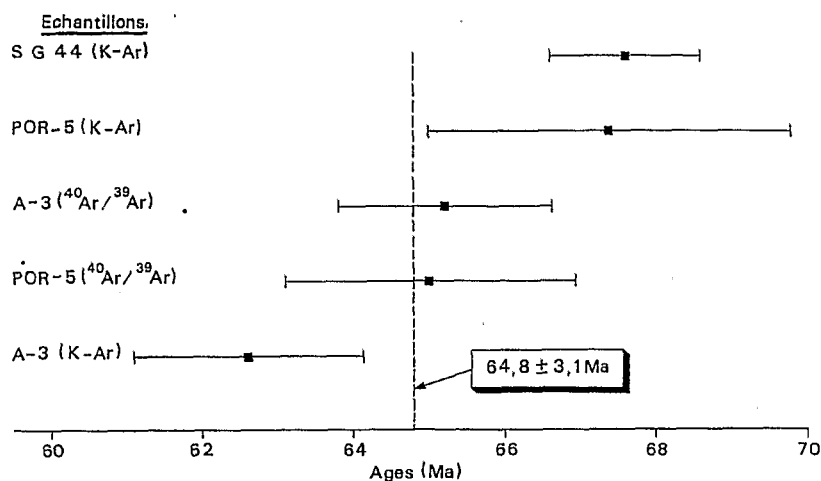


Fig. 4 Diagramme de répartition des âges K-Ar et $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ des gisements du district de Chivor-Macanal ; l'âge à $64,8 \pm 3,1$ Ma est la moyenne pondérée par leur marge d'erreur des cinq mesures.

Diagrammatic representation of K-Ar and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages in the Chivor-Macanal district; $64,8 \pm 3,1$ Ma represents the weighted mean of five analyses.

Le comportement distinct de l'échantillon de Klein lors de l'analyse $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ reste à expliquer, les âges intégrés calculés sur les trois analyses (tableau IIa) étant néanmoins proches de la valeur moyenne de 65 Ma. L'irrégularité des spectres de cet échantillon (fig. 3b) et la mauvaise reproductibilité des mesures qui en résulte pourraient être dues à une perturbation thermique ultérieure. Cette explication est cependant à rejeter, car les autres échantillons prélevés dans le même contexte ne présentent pas ce type d'irrégularités. Leur cause est plus probablement à rechercher dans l'existence de mélanges d'illites et/ou d'irrégularités de structure mises en évidence par diffractométrie X, qui pourraient provoquer des phénomènes de recul interne lors de l'irradiation des échantillons. Ces phénomènes sont surtout caractéristiques de domaines d'argon peu rétentifs, d'âges plus anciens, alors que les portions de spectres de plus haute température fournissent des âges proches de 65 Ma.

CONCLUSION ET DISCUSSION

L'âge des muscovites synchrones du dépôt des minéralisations d'émeraude du district de Chivor-Macanal, établi par les deux méthodes K-Ar et $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, est de 65 ± 3 Ma, correspond à la limite Crétacé-Tertiaire. Les

contrôles géologiques (albitites, BTH, et réseaux de veines) des minéralisations du district de Chivor-Macanal sont identiques à ceux mis en évidence dans les gisements de Muzo et Coscuez. En outre, les données géochimiques recueillies sur les gisements des deux zones (Giuliani *et al.*, 1995) montrent qu'ils se forment de façon similaire, à la faveur de circulations de saumures possédant une signature d'eaux de bassin. Ces analogies suggèrent l'identité du modèle métallogénique pour les gisements des deux zones (Cheilletz et Giuliani, 1996), caractérisé notamment par l'absence de tout lien avec un magmatisme acide ou basique. Il n'y a donc aucune raison d'envisager le développement des minéralisations du district de Chivor-Macanal selon un mécanisme différent de celui mis en évidence pour les minéralisations de la zone occidentale. Celui-ci est caractérisé par le synchronisme d'une déformation tangentielle provoquant l'apparition de niveaux de décollement (BTH ou failles conformes à la stratification) servant de drains et de pièges à des fluides profonds de bassin, à l'origine de la formation d'horizons métasomatisés (albitites) et de réseaux de veines minéralisées (Laumonier *et al.*, 1996).

L'élaboration du schéma détaillé de la répartition spatiale de ces différentes structures et leur interprétation cinématique étant en cours de réalisation pour les gisements de la zone orientale, il n'est pas encore possible d'interpréter strictement ces minéralisations selon le même modèle tectonique que celui élaboré pour les gisements de Muzo et Coscuez. Cependant, il apparaît d'ores-et-déjà que, comme pour les gisements de Muzo et Coscuez, la datation des minéralisations d'émeraude du district de Chivor-Macanal entraîne *de facto* la datation d'un épisode de tectonique de décollement affectant la couverture de la Cordillère orientale. L'âge de cet épisode, à la limite Crétacé-Tertiaire, apparaît relativement précoce dans l'histoire tectonique de la Cordillère orientale ; il a cependant déjà été signalé, notamment dans la Sierra Nevada del Cocuy, où il se traduit par un épisode de soulèvement, et dans le bassin d'avant-pays pré-andin, où il souligne le pas-

sage d'une mégaséquence marine à une mégaséquence continentale (Cooper *et al.*, 1995).

Cet âge est plus vieux de 30 Ma que celui déterminé pour les gisements de Muzo et Coscuez (38-32 Ma ; Cheilletz *et al.*, 1994) dans la zone occidentale, cette différence s'appliquant à des objets métallogéniques de même nature et développés dans le même contexte géologique. En fait, ce résultat n'est pas en contradiction avec l'évolution paléogéographique et tectonique de la chaîne. On distingue en effet deux sous-bassins au Crétacé inférieur dans la Cordillère orientale, séparés par le haut-fond du paléomassif de

Santander : les bassins de Cocuy à l'est et de Tablazo-Magdalena à l'ouest incluant respectivement les zones à émeraude orientale et occidentale. Les âges distincts de ces deux zones reflèteraient donc une histoire tectonique pré-andine indépendante pour ces deux sous-bassins, probable conséquence de caractères acquis dès leur origine, comme par exemple l'existence d'un haut-fond au centre du bassin principal. A cela s'ajoute, à partir de la transition Crétacé-Tertiaire, un régime de convergence oblique des plaques Nazca et sud-américaine, responsable de l'application de contraintes non uniformes et hétérochrones sur les différentes parties de ce vaste bassin d'arrière-arc de la Cordillère orientale.

Remerciements : les auteurs remercient particulièrement Don Pedro et Uvaldo Montenegro de la *Sociedad Minera San Pedro*, Carlos Umbacia de la *Empresa de Esmeraldas de Guali* et la *Empresa Chivorena de Minas S.A.* pour leur assistance précieuse sur le terrain, Daniel Faure pour son amical encouragement ainsi que Norbert Clauer pour ses corrections pertinentes du manuscrit.

Ce travail a été réalisé grâce aux financements Ecotech-CNRS (contrat ARC 215) et Commission européenne DG XII (contrat CT 94-0098). Contributions IGCP 342 et CRPG n° 1214.

- CHEILLETZ, A., FÉRAUD, G., GIULIANI, G. et RODRIGUEZ, C.T., 1994. Time-pressure and temperature constraints on the formation of Colombian emeralds: an $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ laser microprobe and fluid inclusion study, *Econ. Geol.*, 89, p. 361-380.
- CHEILLETZ, A. et GIULIANI, G., 1996. The genesis of Colombian emeralds: a restatement, *Mineral. Deposita*, 31, p. 359-364.
- COOPER, M.A., ADDISON, F.T., ALVAREZ, R., CORAL, M., GRAHAM, R.H., HAYWARD, A.B., HOWE, S., MARTINEZ, J., NAAR, J., PE-AS, R., PULHAM, A.J. et TABORDA, A., 1995. Basin development and tectonic history of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middel Magdalena Valley, Colombia, *Am. Ass. Petrol. Geol. Bull.*, 79, n° 10, p. 1421-1443.
- GIULIANI, G., CHEILLETZ, A., ARBOLEDA, C., CARILLO, V., RUEDA, F. et BAKER, J.H., 1995. An evaporitic origin of the parent brines of Colombian emeralds: fluid inclusion and sulfur isotope evidence, *Eur. J. Mineral.*, 7, p. 151-165.
- LAUMONIER, B., BRANQUET, Y., LOPÈS, B., CHEILLETZ, A., GIULIANI, G. et RUEDA, F., 1996. Mise en évidence d'une tectonique compressive Éocène-Oligocène dans l'ouest de la Cordillère orientale de Colombie, d'après la structure en duplex des gisements d'émeraude de Muzo et Coscuez, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 323, p. 705-712.
- ULLOA, C. et RODRIGUEZ, E., 1976. Geología del cuadrángulo K-12, Guatèque, *Bol. Geol., Bogotá*, 22, n° 1, p. 1-55.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES