

## L'OCCIDENT ÉQUATORIEN: Un terrain océanique pacifique accolé au continent sud-américain

*François Mégard\*, Pierric Roperch\*\*, Michel Lebrat\*,  
Carlo Laj\*\*\*, Thomas Mourier\*\*\*\*, Christophe Noblet\*\*\*\*\**

### Résumé:

Cet article a pour propos de présenter les principaux traits géologiques de la partie occidentale de l'Equateur et de faire connaître les premiers résultats d'une étude paléomagnétique entreprise dans cette région en 1985.

L'ensemble des données est interprété dans le cadre mobiliste de la tectonique globale. Nous proposons finalement que la partie occidentale de l'Equateur se soit formée dans le Pacifique, puis qu'elle soit venue se coller au vieux continent sud-américain sous la forme d'un terrain exotique semblable à ceux connus ailleurs, notamment dans les chaînes péripacifiques.

### Resumen:

Este artículo tiene el propósito de presentar los principales rasgos geológicos de la parte occidental del Ecuador y de dar a conocer los primeros resultados de un estudio del paleomagnetismo de esta región, emprendido en 1985.

El conjunto de los datos se interpreta luego en el marco de la teoría movilista de la tectónica de placas. En conclusión, proponemos que la parte occidental del Ecuador se haya formado en el Pacífico, para luego derivar y finalmente acrecionarse al viejo continente sudamericano, bajo forma de un terreno exótico similar a aquellos conocidos en otras cadenas de montañas y particularmente en las que circundan el Pacífico.

\* Centre Géologique et Géophysique, USTL, place Eugène Bataillon, 34000 Montpellier.

\*\* ORSTOM. Laboratoire de Géophysique, Université de Rennes, 35042 Rennes. Cedex.

\*\*\* Centre des Faibles Radioactivités, Laboratoire mixte CNRS-CEA, B.P.1; 91190 Gif sur Yvette.

\*\*\*\* Laboratoire de Géologie Historique, Université de Paris-Sud, 91405 Orsay Cedex.

\*\*\*\*\* IFEA et mission ORSTOM, Apartado 6596 CCI, Quito.

ORSTOM Fonds Documentaire

N° : 26.205 ex 1

Cote : B P168

28 MARS 1989

## Abstract:

We present here a review of the major geological features of western Ecuador including the first results of a paleomagnetic survey performed in 1985.

The data are interpreted in the frame of global tectonics. We suggest that western Ecuador consists of exotic terranes that formed in the Pacific Ocean and were subsequently accreted to nuclear South America. This evolution is similar to that of other segments of the mountain belts surrounding the Pacific.

L'évidente continuité de l'orogène andin se manifeste en particulier dans les reliefs, la ceinture volcanique d'âge fini-éocène à quaternaire prise dans son ensemble, et la présence d'une ceinture subandine, écaillée vers l'est sur les bassins orientaux d'avant-pays. Cette continuité est due à l'évolution post-éocène de cet édifice montagneux, qui oblitère en partie une évolution mésozoïque et éotertiaire bien différente selon les segments considérés (cf. Aubouin, 1972; Zeil, 1979; Mégard, 1984, 1987).

Au nord du coude d'Arica (18° S), cette différence se traduit par l'opposition des Andes centrales (au sud de 8° S), dans lesquelles l'orogène andin mésozoïque est dû à la déformation de la bordure de la plaque continentale sud-américaine sous l'influence de la subduction d'une plaque océanique est-pacifique, qui est actuellement la plaque Nazca, et des Andes septentrionales où des roches basiques et ultrabasiqes, du type de celles connues actuellement dans les océans ou les mers marginales, ont été incorporées à la bordure de la plaque continentale (p.ex. Aspden et Mc Court, 1986; Feininger, 1987; Mégard, 1987). C'est donc la présence ou l'absence de "terrains exotiques accrésés" qui fait la différence que nous venons de souligner. Les terrains exotiques peuvent inclure des masses continentales d'origine plus ou moins lointaine: ainsi dans le NW du Pérou et le SW de l'Equateur, le bloc Amotape-Tahuin serait un bloc continental probablement arraché à l'Amérique du Sud puis recollé à la même Amérique, mais à une autre latitude (Feininger, 1987; Mourier, Mégard *et al.* 1987, et Mourier, Laj *et al.* en prép.).

Dans le présent article, nous nous bornerons à présenter les données récentes sur la géologie de l'Equateur au nord de 3° S et les résultats de nos premières études paléomagnétiques.

## LES DONNÉES GÉOLOGIQUES

En Equateur, au nord de 3°S, de même qu' en Colombie, toute la partie ouest du pays —côte et Cordillère occidentale— qu'on peut appeler Occidente, a un substratum comparable à celui des océans ou des arcs insulaires, tandis que la partie est, ou Oriente\*, qui comprend la Cordillère orientale, la zone subandine et l'Amazonie, a un substratum essentiellement sialique (Fig. 1).

## L'Oriente

Il ne fait pas de doute que l'Amérique du Sud nucléaire, constituée d'un grand craton subdivisé au Paléozoïque en boucliers guyanais et brésilien, s'étende au moins jusqu'à la bordure est de la Cordillère orientale. Ce craton n'affleure pas en Equateur, mais on le connaît en Colombie dans le bloc soulevé de la Sierra de la Macarena et au Pérou dans celui de Shira, et on le repère sur nombre d'enregistrements sismiques pétroliers et dans divers sondages. Le socle rigide précambrien est recouvert par une série sédimentaire d'âge paléozoïque à pliocène qui s'épaissit en direction des Andes. Cet épaississement concerne essentiellement les termes d'âge éocène à pliocène de cette série, car pendant cette époque, le bassin péricratonique a fonctionné

\* Le terme Oriente tel que nous l'utilisons ici, a une acception géologique calquée sur celle qu'on lui donne en Colombie, et donc différente de son sens géographique habituel dans lequel sont seules englobées les régions situées à l'est des Andes.

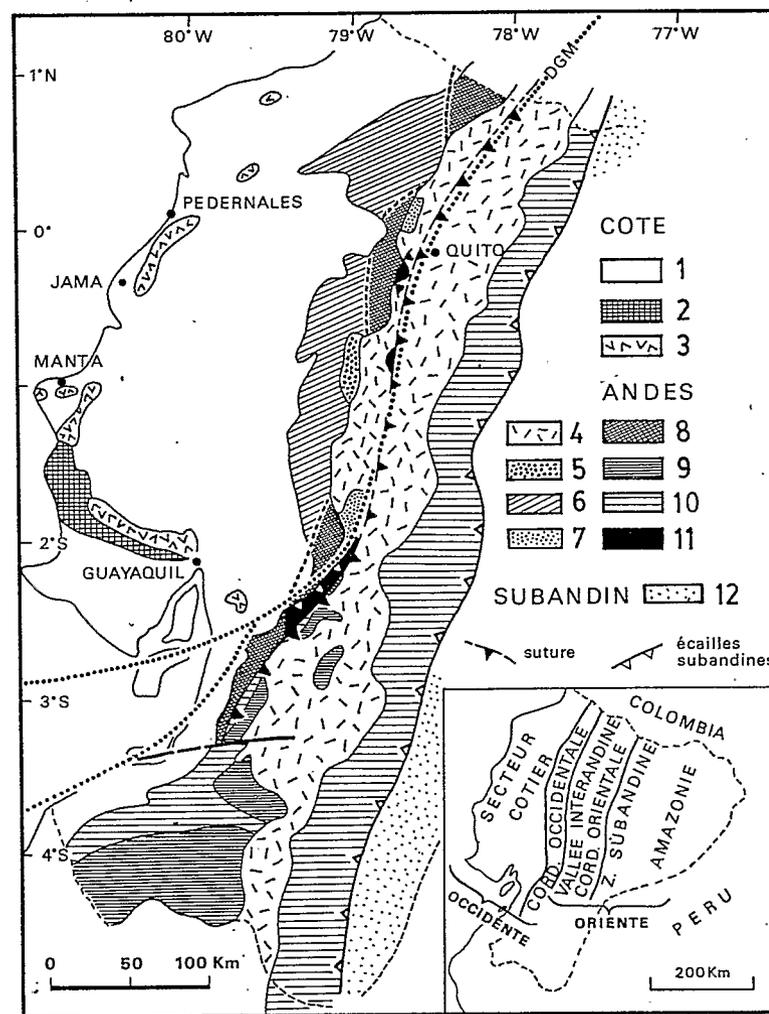


Fig. 1.— Carte géologique schématique de l'Equateur

Côte: 1) couverture tertiaire; 2) Formation Cayo; 3) Formation Piñon.

Andes: 4) couverture oligocène à quaternaire volcanique et terrigène; 5) calcaires, flyschs et conglomérats éocènes de la partie supérieure de l'arc insulaire Macuchi; 6) roches volcaniques de l'arc Macuchi; 7) flyschs et conglomérats maastrichtiens à paléocènes de la partie supérieure de l'arc Nono-Shobol; 8) roches volcaniques de l'arc continental Celica et roches sédimentaires associées; 9) roches métamorphiques mésozoïques et pré-mésozoïques; 11) écaillages ophiolitiques de la suture.

Subandin: roches sédimentaires indifférenciées.

en bassin flexural d'avant-pays, à partir du moment où la lithosphère "guyano-brésilienne" a fléchi sous le poids de l'orogène andin qui commençait à la chevaucher et à surcharger de ce fait son extrémité occidentale.

La Cordillère Orientale (ou Real) est constituée de roches métamorphiques allant du faciès schiste vert au faciès amphibolite (Herbert, 1983; Feininger, 1982). L'âge du dernier épisode métamorphique ayant affecté ces séries varie de  $81 \pm 2$  à  $72 \pm 3$  millions d'années dans le sud du pays et de  $60.6 \pm 2.3$  à  $53.6 \pm 1.6$  Ma dans le nord (respectivement Herbert, 1983 et Feininger, 1982) en ne tenant compte que des données Potassium/Argon sur biotite ou muscovite. L'âge des roches originelles, ou protolithes, est plus ancien mais reste hypothétique et leur histoire pourrait être complexe: selon Aspden et Litherland (com. orale, E.U.G. IV, 1987 à Strasbourg) des roches ultrabasiqes et définiraient une suture, peut-être d'âge crétacé inférieur comme la plus ancienne suture andine de Colombie (Bourgeois *et al.*, 1985; Aspden et Mc Court, 1986), et une partie de la Cordillère orientale serait un arc insulaire.

La Vallée interandine, où affleure essentiellement la couverture volcanique et volcanosédimentaire tertiaire et quaternaire, a un substratum très mal connu qui inclut des séries siliciclastiques faiblement métamorphiques et des roches volcaniques attribuées au Crétacé et au Tertiaire inférieur. Celles-ci sont étiquetées "Formation Macuchi" sur les cartes (p. ex. carte géologique au 1/1000 000, DNGM, 1982) mais, contrairement à ce que suggère cette appellation, n'ont probablement rien de commun avec la Formation Macuchi s.s. de la Cordillère occidentale. Nous soupçonnons qu'elles puissent représenter le prolongement vers le nord de l'arc volcanique intracontinental Celica, d'âge aptien supérieur à campanien, bien exposé dans le sud de l'Equateur, et/ou de son successeur éotertiaire Sacapalca.

Un dernier point important est la présence, sous la ville de Quito, d'un substratum sialique ramoné par le volcan Pichincha (Bruet, 1949). Cet élément de croûte continentale peut représenter, soit le bord ouest de l'Amérique du Sud nucléaire, soit une partie d'un bloc continental exotique accréte (cf. hypothèse de Aspden et Litherland, par. précédent).

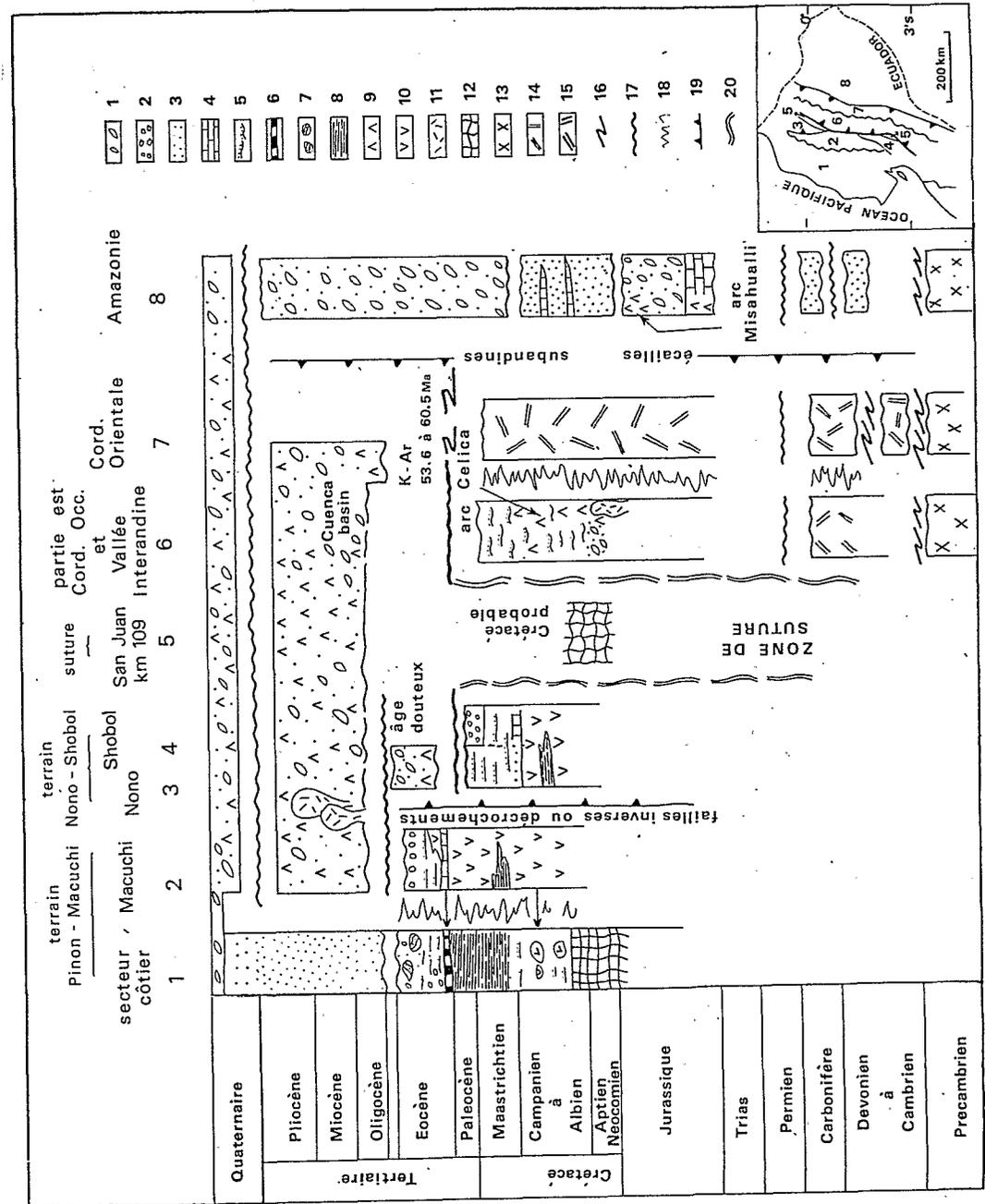
### L'Occidente

Une suture suit le bord ouest de la Vallée interandine entre la frontière colombienne et  $1^{\circ}40'S$  et, plus au sud, se situe dans le flanc ouest de la Cordillère Occidentale. Elle sépare Oriente et Occidente et nous l'étudierons plus loin. A l'ouest de cette suture, on ne connaît pas de substratum sialique et des données de terrain, appuyées par celles de la géochimie (Goossens et Rose, 1973; Goossens *et al.*, 1977; Lebrat, 1985; Lebrat *et al.*, 1987) et de la gravimétrie (Feininger et Seguin, 1983), permettent de conclure à la présence d'un substratum océanique sous l'ensemble de l'Occidente.

Dans la Cordillère occidentale, on observe deux ensembles stratigraphiques similaires mais d'âges différents. Le plus typique peut être appelé Macuchi (Fig. 2); il est formé d'une série volcanique incluant des laves souvent en coussins et des brèches dites hyaloclastiques parce

Fig. 2.— Colonnes stratigraphiques et diagramme montrant les principales unités et l'histoire de l'accrétion mésozoïque et cénozoïque en Equateur.

1) formations terrigènes non marines; 2) conglomérats marins; 3) formations terrigènes marines de faible profondeur; 4) roches marines carbonatées de faible profondeur; 5) flyschs terrigènes; 6) flyschs calcaires; 7) olistostromes; 8) roches sédimentaires marines à grain fin, de grande profondeur; 9) roches volcaniques d'arc continental; 10) roches volcaniques d'arc océanique; 11) granitoïdes; 12) ophiolites; 13) socle précambrien; 14) roches métamorphiques de bas rapport Pression/Température; 15) roches métamorphiques de haut rapport P/T; 16) phase de métamorphisme et de déformation; 17) phase de déformation sans métamorphisme; 18) changement de faciès latéral; 19) chevauchement; 20) zone de suture.



qu'elles contiennent une proportion élevée d'éclats de matériel vitreux, provenant de l'éclatement des parties extérieures des coussins laviques au contact de l'eau. Ce matériel volcanique a une composition qui varie de celle d'andésites basiques, et même de basaltes tholéitiques de type transitionnel, à celle de dacites (Henderson, 1979; Lebrat, 1985).

Les analyses des éléments majeurs et celles, plus diagnostiques, des éléments en traces, terres rares et autres éléments incompatibles en particulier, permettent d'affirmer que ce matériel appartenait à un arc insulaire, comparable à ceux que l'on connaît actuellement dans l'ouest du Pacifique, celui des îles Mariannes par exemple (Lebrat, 1985). Cet arc volcanique intraocéanique Macuchi est actif au Crétacé supérieur et jusqu'à l'Eocène, puisque ses coulées les plus élevées s'intercalent avec — et sont recouvertes par — des sédiments de cet âge. En plusieurs points de la Cordillère occidentale, dont Macuchi, ces sédiments sont des calcaires récifaux à algues et foraminifères qui se sont déposés à fleur d'eau ou à quelques mètres de profondeur (Henderson, 1979; Eguez, 1986). Ils sont recouverts sans transition par des roches volcanoclastiques de type flysch, déposées par des courants turbides et contenant encore des fossiles éocènes (Eguez, 1986). Ces flyschs, vers le haut, reçoivent d'un coup les apports continentaux: quartz, micas et galets de roches diverses, dont des roches métamorphiques (Faucher et Savoyat, 1973). Or, on sait que les flyschs se déposent à des profondeurs allant de quelques centaines à plusieurs milliers de mètres et forment souvent le remplissage actuel des fosses océaniques. Ces considérations permettent d'interpréter l'évolution sédimentaire qui clôt le "cycle Macuchi" par la descente de l'arc Macuchi dans la fosse océanique bordant à l'ouest le continent sud-américain. Cette descente s'est accompagnée de l'arrêt du fonctionnement de l'arc Macuchi et a été suivie par l'incorporation à la marge continentale de cet arc et des sédiments associés. C'est lorsque l'arc a atteint la fosse que les flyschs ont commencé à se charger en débris d'origine continentale.

On peut interpréter d'une façon similaire l'évolution enregistrée par les colonnes stratigraphiques semblables (Fig. 2) de la région de Nono, au NW de Quito, et de celle de Shobol, entre Guaranda et Riobamba. On y retrouve à la base une série volcanique d'arc, recouverte par un flysch volcanoclastique en partie carbonaté qui s'enrichit vers le haut en clastes provenant du continent (p. ex. Bristow et Hoffstetter, 1977). Cette fois le flysch est d'âge crétacé terminal à paléocène, et la descente de l'arc Nono-Shobol dans la fosse s'effectue à cette époque, c'est-à-dire 15 à 20 millions d'années avant celle de l'arc Macuchi.

Sur la base de ces données et de ces interprétations, on peut postuler l'existence, dans la Cordillère occidentale, de deux terrains exotiques de type arc insulaire, le terrain Nono-Shobol, accrété au Paléocène, et le terrain Macuchi, accrété à l'Eocène moyen ou supérieur (Fig. 1 et 2). Visualisé en deux dimensions, le scénario répété ayant eu pour résultat l'accrétion de chacun de ces arcs pourrait être du type de celui schématisé dans la figure 5, mais d'autres solutions peuvent être proposées (cf. p. ex. Feininger et Bristow, 1980). Dans ce scénario, l'accrétion a pour résultat la désactivation de la zone de subduction bordant le continent ainsi que celle de l'arc volcanique intracontinental associé. Malgré les incertitudes qui pèsent encore sur la chronologie du volcanisme de la bordure ouest du continent sud-américain, on peut, dans le sud de l'Equateur et pour la période crétacé supérieur-miocène, distinguer trois périodes volcaniques correspondant à autant d'arcs intracontinentaux successifs. Le premier est l'arc Celica, crétacé supérieur, suivi de l'arc Sacapaica, paléogène, qui ne s'en distingue pas toujours facilement, puis de l'arc Saraguro, en partie d'âge oligocène. On peut penser que les réajustements signalant le passage d'un arc à l'autre sont contemporains des accrétions.

Le secteur côtier a sa colonne stratigraphique propre (Fig. 2), qui débute par un complexe basique igné (Goossens et Rose, 1973), dit Formation Piñon, formé très largement de basaltes et de dolérites ayant des caractéristiques géochimiques similaires à celles des basaltes des rides médio-océaniques actuelles, ainsi que de péridotites. Il est interprété comme un segment de plancher océanique d'âge crétacé inférieur. Il est recouvert par des flyschs volcanoclastiques du Crétacé supérieur (Formation Cayo) incluant des coulées de débris où sont transportés des galets et blocs, atteignant le mètre cube, de roches volcaniques allant des andésites basiques à des rhyolites. Nous supposons que ces clastes proviennent de l'arc Macuchi, à défaut de leur connaître une autre origine possible. Plus haut dans la série, des flyschs carbonatés

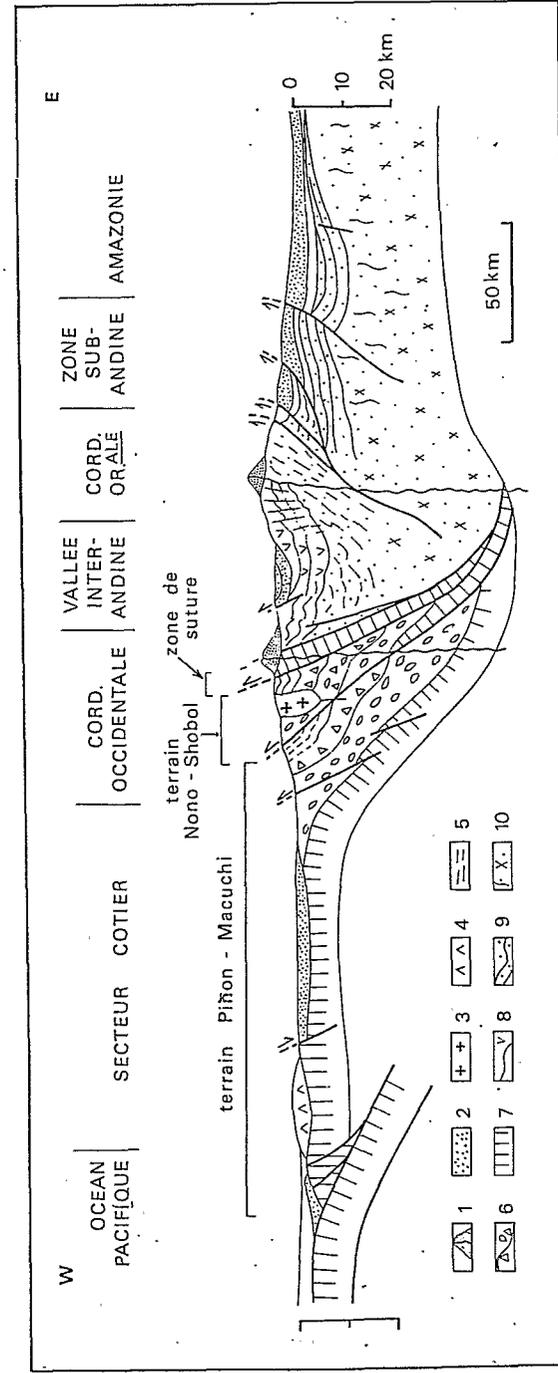


Fig. 3.— Coupe structurale schématique des Andes d'Equateur, à partir de données recueillies entre 0° et 2°30'S, d'après Mégard, 1987. Toutes zones: 1) volcans du Cénozoïque supérieur; 2) roches clastiques et volcaniques oligocènes et néogènes; 3) plutons tertiaires. Océan Pacifique et terrains exotiques: 4) Formation Cayo; 5) couverture sédimentaire des arcs insulaires accrétés; 6) roches volcaniques de ces arcs; 7) croûte océanique. Bord ouest de l'Amérique du Sud nucléaire: 8) roches sédimentaires mésozoïques, localement schistoseuses (les "v" indiquent les roches volcaniques de l'arc continental Celica); 9) roches paléozoïques en partie métamorphiques; 10) socle précambrien.

contiennent le matériel, redéposé, des calcaires récifaux éocènes connus dans le "terrain exotique Macuchi" de la Cordillère occidentale. Ainsi que Feininger et Bristow (1980), nous trouvons là un argument de poids en faveur de la continuité de l'aire Piñon de la côte et de l'aire Macuchi et pensons, tout comme Feininger (1987), qu'elles forment partie d'un même terrain exotique Piñon-Macuchi.

Des coulées basaltiques sont intercalées dans les flyschs Cayo, en particulier dans la région de Manta et dans celle de Pedernales (Fig. 1). Les premiers ont fait l'objet d'une étude géochimique (Lebrat, 1985; Lebrat *et al.*, 1987); ils ont des compositions de roches d'arcs insulaires. Leurs âges radiométriques K/Ar (Hall et Calle, 1982) et Ar39/Ar40 (Lebrat *et al.*, 1987) les placent dans le Crétacé supérieur. Dans la région de Guayaquil, la Formation Cayo contient des andésites, qui peuvent être des coulées ou des sills. Il faut aussi noter dans la même région plusieurs affleurements de granitoïdes, dont celui de la granodiorite de Pascuales, d'âge compris entre 75 et 56 Ma (Hall et Calle, 1982). Toutes les roches ignées du Crétacé supérieur-Eocène que nous venons de mentionner ne forment pas de volumes importants, sauf les basaltes de la région de Pedernales. Leur présence est cependant difficile à expliquer dans l'hypothèse de la Figure 5, où la zone Piñon se trouve en position d'avant-arc, hypothèse que nous adoptons cependant pour d'autres raisons (voir p.52).

#### La géométrie des terrains exotiques et de la suture

L'accrétion de terrains exotiques à une marge continentale peut s'effectuer par deux modalités très différentes: chevauchement des terrains sur la marge ou insertion des terrains sous la marge dans un gigantesque prisme d'accrétion. L'étude de la géométrie des chaînes de collision unie à celle de l'évolution sédimentaire et volcanique (cf. par. précédent) permet en général d'en décider.

Dans le cas de l'Equateur, l'existence de nappes formées de matériel océanique ou de matériel d'arc insulaire, qui auraient été charriées sur la marge continentale entre la fin du Crétacé et le début de l'Oligocène, n'a pu être démontrée. La zone côtière apparaît comme un panneau rigide, déformé essentiellement par une tectonique cassante faisant intervenir des failles raides. Les pendages y sont faibles, sauf rares exceptions. Le contact zone côtière-Cordillère occidentale est caché par le bassin récent du río Guayas. La suture de la Cordillère occidentale n'est connue que partiellement, au long de quelques coupes. Elle est caractérisée par des plis en chevrons N-S, le plus souvent assez ouverts, et par une prédominance des panneaux à pendage est. La déformation intime des roches est en général peu prononcée: seule une schistosité de fracture est associée localement aux plis en chevron (coupe Riobamba-Bucay par exemple).

De rares éléments de la zone de suture sont bien exposés: il apparaissent comme des écaillés de matériel océanique à pendage est. C'est le cas du complexe ophiolitique de la Quebrada San Juan, 20 km au SW de Quito, où le litage magmatique dans les gabbros pend fortement à l'est (Juteau *et al.*, 1977). C'est aussi le cas dans la grande écaillé de Multitud (Lebrat *et al.*, 1985) où les pillow lavas pendent à l'est, de même que le contact avec les flyschs de l'unité sous-jacente qui est probablement celle de Shobol, contact observé au km 109 de la route Riobamba-Bucay. À l'est de la suture, des schistes graphitiques et quartzites, qui sont probablement prémésozoïques, forment le soubassement de séries volcaniques de type Celica, quoique cartographiées en "Crétacé Macuchi" sur la feuille de Gualleturo, DNGM, 1980. Ce substratum continental est exposé notamment au long de la route la Troncal-Cañar, sur l'ancien et le nouveau tracé, en plusieurs points entre Cochancay et Jabin, et sa foliation pend fortement au SE, à proximité de la suture.

Ces quelques observations concordantes donnent l'impression que la suture majeure est un cisaillement à pendage est, dont le tracé serait en gros celui de la zone de subduction du Crétacé terminal-Paléocène, juste avant l'accrétion du terrain Nono-Shobol. La suture relativement mineure séparant le terrain Nono-Shobol du plus grand terrain Piñon-Macuchi n'est pour l'instant pas repérée avec précision. Elles pourrait coïncider localement avec certaines des failles raides cartographiées par Eguez (1986).

De fait, tous les raisonnements géométriques devraient se faire non seulement sur des coupes E-W, mais aussi dans le plan horizontal, car diverses données nous font soupçonner que les accrétions se sont effectuées non pas frontalement, mais très obliquement. D'une part on note, dans la Cordillère occidentale équatorienne, l'allure lenticulaire en plan de nombreux blocs limités par des failles subverticales, ce à toutes les échelles, observation également faite en Colombie par Mc Court *et al.* (1984). D'autre part, les reconstructions du mouvement relatif des plaques océaniques et continentales à la marge ouest de l'Amérique du Sud (Pilger, 1983; Cande et Leslie, 1986), montrent que le vecteur de convergence de ces plaques a été proche de la direction E-W dans les 26 derniers millions d'années, mais était auparavant NE-SW. Une forte composante oblique de donc caractérisé la cinématique de la subduction, et, partant, celle de l'accrétion, avant 26 Ma.

#### DONNÉES PALÉOMAGNÉTIQUES

Elles sont le résultat de deux campagnes d'échantillonnage centrées sur la zone côtière et la Cordillère occidentale. Leur but: tester par la méthode paléomagnétique les hypothèses d'allochtonie de ces deux régions, hypothèses basées initialement sur des faits géologiques et des données gravimétriques (voir supra).

#### La Méthode

La méthode paléomagnétique est basée sur le fait que l'aimantation des particules magnétiques présentes dans une roche s'oriente suivant le champ magnétique existant au moment de la formation de celle-ci. D'autre part, on sait que le champ géomagnétique à la surface de la terre a gardé au cours des époques géologiques la structure dipolaire centrée qu'on lui connaît actuellement.

Si l'aimantation d'une roche reste stable au cours du temps, et il existe des méthodes de laboratoire qui permettent de s'en assurer, toute déviation de la direction de l'aimantation par rapport à la direction dipolaire traduit l'existence d'un mouvement de la formation géologique à laquelle appartient la roche considérée. Ainsi, un écart de la déclinaison paléomagnétique par rapport à l'axe nord-sud témoigne d'une rotation, et une valeur de l'inclinaison différente de l'inclinaison dipolaire traduit un mouvement latitudinal (pour fixer les idées, l'inclinaison est nulle à l'équateur et vaut  $\pm 90^\circ$  aux pôles).

Pour chaque continent stable, on a ainsi défini une courbe de référence, dite courbe de dérive apparente du pôle, qui décrit en fait le mouvement du continent. Les différentes régions ayant fait partie de ce continent depuis toujours (formations autochtones) seront caractérisées par des courbes identiques de dérive apparente des pôles. Inversement, des différences entre les courbes de diverses régions, pour une époque donnée, témoignent d'une évolution géodynamique distincte de ces régions. La méthode paléomagnétique est donc un outil de choix pour identifier des blocs, dits allochtones ou exotiques, venus s'accoler à une marge continentale.

Nous avons exclusivement travaillé en Equateur sur des roches volcaniques d'âge crétacé supérieur, période pour laquelle on connaît assez bien le magnétisme du continent stable qui a des caractéristiques très proches de celles du champ actuel.

#### Les conditions de prélèvement

Dans la zone côtière, nos prélèvements ont été effectués sur 20 sites répartis sur près de 250 km entre  $0^\circ$  et  $2^\circ 10'S$ , sur des roches basiques qui sont des basaltes en coussin, des basaltes prismés et des dolorites massives. Un certain nombre de ces sites, en particulier ceux proches de Guayaquil, correspondent à la Formation Piñon, c'est-à-dire au substratum océanique. Ceux de la région de Pedernales-Jama correspondent, pour la plupart, à des basaltes associés à des roches sédimentaires volcanoclastiques qui appartiennent vraisemblablement à la Formation Cayo du Crétacé supérieur. Enfin, ceux de la région de Manta sont situés pour une part dans la

Formation Piñon, et pour une autre part dans des basaltes en coussin ou prismés, dits Formation San Lorenzo (Lebrat *et al.*, 1987), qui s'intercalent dans la partie la plus haute de la Formation Cayo. Ils ont livré des âges radiométriques K/Ar de  $87 \pm 10$  et  $66 \pm 5$  Ma (Kennerley, 1980) et un âge Ar<sup>39</sup>/Ar<sup>40</sup> de  $72.7 \pm 1.4$  Ma (Féraud *in* Lebrat *et al.*, 1987). Les basaltes San Lorenzo se seraient donc mis en place au cours du Crétacé terminal. Dans la plupart des sites étudiés, ces formations montrent des pendages faibles, le plus souvent dus à des basculements par failles.

Nous avons aussi échantillonné les roches volcaniques crétacées et éo-tertiaires de la Cordillère occidentale en 5 sites répartis sur 200 km du nord au sud. Les conditions d'échantillonnage y sont moins favorables du fait des pendages souvent forts et de l'état de déformation des roches plus intense que sur la côte. L'intensité du magnétisme rémanent mesuré dans ces roches varie en fonction de leur fraîcheur, c'est-à-dire en fonction inverse de leur état d'altération.

### Résultats

L'aimantation naturelle rémanente des roches (ou NRM) a été mesurée pour chaque site sur une dizaine de carottes cylindriques, d'un pouce de diamètre, prélevées à la foreuse. Les mesures ont été réalisées avec des magnétomètres Schonstedt ou Digico. La stabilité de l'aimantation a été étudiée par des techniques standard en désaimantant progressivement les échantillons par des champs alternatifs, d'intensité croissante jusqu'à 100 millitesla (unité d'induction magnétique), ou par des températures croissant jusqu'à 580°C. Les changements de direction observés ont été reportés sur des diagrammes dits de Zijderfeld. Les échantillons ayant un comportement ambigu lors de la démagnétisation ont été exclus des groupes de données et les directions successives obtenues sur des tranches différentes d'une même carotte ont été moyennées, l'ensemble des données d'un même site étant enfin traité par la méthode statistique de Fisher.

Les propriétés magnétiques des roches étudiées dépendent clairement des unités lithologiques auxquelles elles appartiennent. Ainsi, nous observons des intensités d'aimantation de 10 à 100 A/m (Ampères par mètre) sur les laves en coussin de la Formation San Lorenzo, près de Manta. Par ailleurs, les points de Curie des différentes roches prélevées et leurs températures de déblocage varient dans des limites atteignant 200°C, en fonction de l'état d'oxydation des grains de titanomagnétite porteurs de l'aimantation et de la quantité de titanomagnétite présente dans les roches. De telles propriétés magnétiques sont caractéristiques des basaltes océaniques prélevés au fond des océans actuels et sont similaires à celles de certains massifs ophiolitiques (Fox et Opdyke, 1973; Banerjee, 1980). Les échantillons provenant des unités doléritiques ont une aimantation moins intense et leurs courbes thermomagnétiques indiquent la présence de magnétite pure.

La majorité des échantillons de la zone côtière ont des courbes de désaimantation simples et cohérentes, que ce soit par désaimantation thermique ou par champs alternatifs, comme le montrent les diagrammes de Zijderfeld de la Figure 5. Nous avons cependant dû éliminer 3 sites sur 23 du fait de la grande dispersion des résultats pour chacun de ces sites et/ou d'un comportement instable en cours de désaimantation.

Pour la Cordillère occidentale, la plupart des données sur les roches volcaniques Macuchi sont ambiguës, parce que des empreintes magnétiques superposées et un comportement instable rendent difficile l'identification de l'aimantation rémanente primaire. La seule exception concerne un site proche de la mine de Macuchi (Fig. 4), dans des roches volcaniques qui seraient éocènes selon la carte d'Eguez (1986). Les données de ce site sont en accord avec celles de la côte.

Le diagramme de la Figure 6 montre que les aimantations rémanentes primaires pour les sites retenus se groupent loin de la direction du champ dipolaire et qu'elles ont des polarités normales pour les unes, inverses pour les autres, qui sont diamétralement opposées. Du fait des

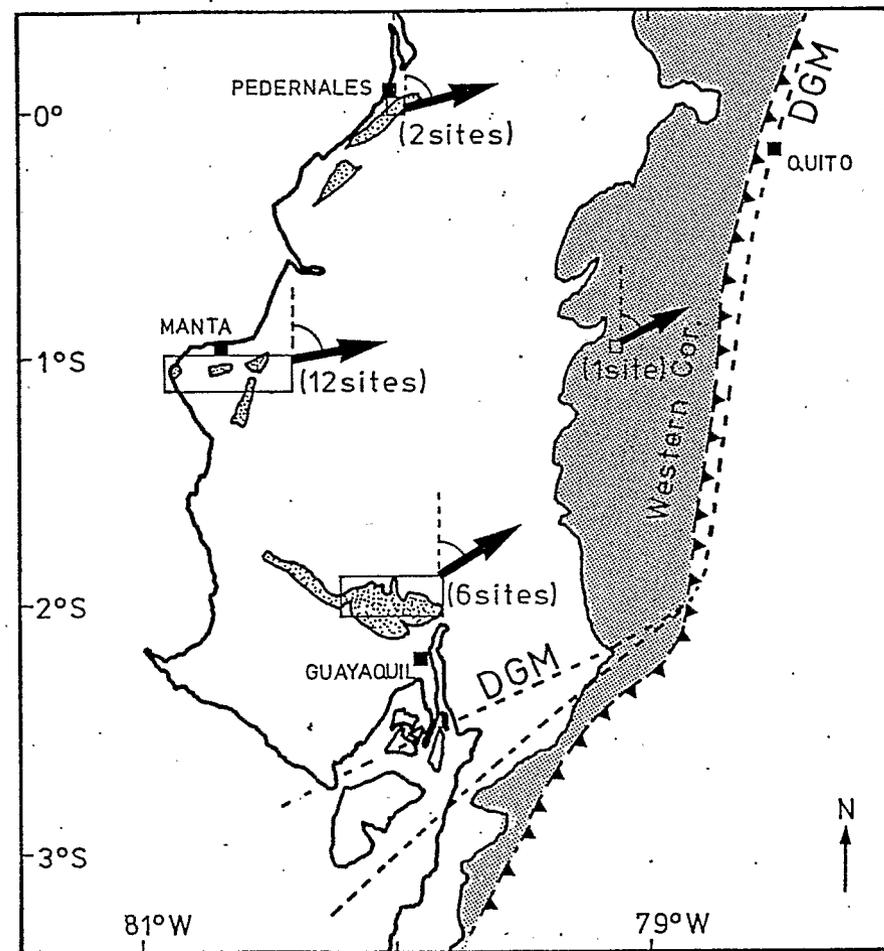


Fig. 4.— Localisation des zones d'échantillonnage paléomagnétique et déclinaisons paléomagnétiques moyennes pour chaque groupe de sites, d'après Roperch *et al.*, 1987. Le pointillé serré indique les affleurements de l'arc volcanique Macuchi (s.l.) et le pointillé lâche, ceux des basaltes Piñon et San Lorenzo. DGM = faille Guayaquil-Dolores.

faibles inclinaisons enregistrées, on ne peut déterminer sans ambiguïté la polarité du champ paléomagnétique au moment où l'aimantation rémanente a été enregistrée dans les roches. L'interprétation la plus vraisemblable est que les directions localisées dans le quadrant NE du diagramme de la Figure 6, ont une polarité normale et que les formations rocheuses étudiées ont subi une rotation horaire de près de 70°. La dispersion observée de site à site, assez marquée pour ce qui est de la déclinaison, peut résulter d'une rotation différentielle liée au fait que l'âge des roches prélevées est mal connu et peut varier.

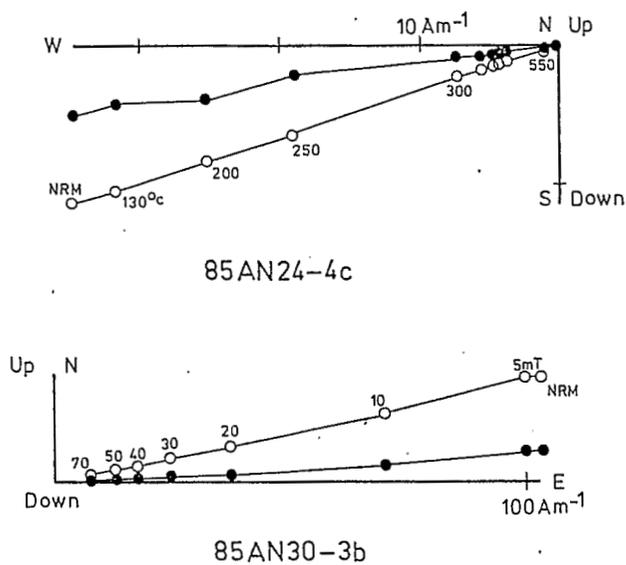


Fig. 5.— Courbes de désaimantation typiques par champ alternatif et par chauffage pour des échantillons de polarités différentes. Cercles pleins: projection sur un plan horizontal; cercles vides: projection sur le plan vertical E-W. D'après Roperch *et al.*, 1987.

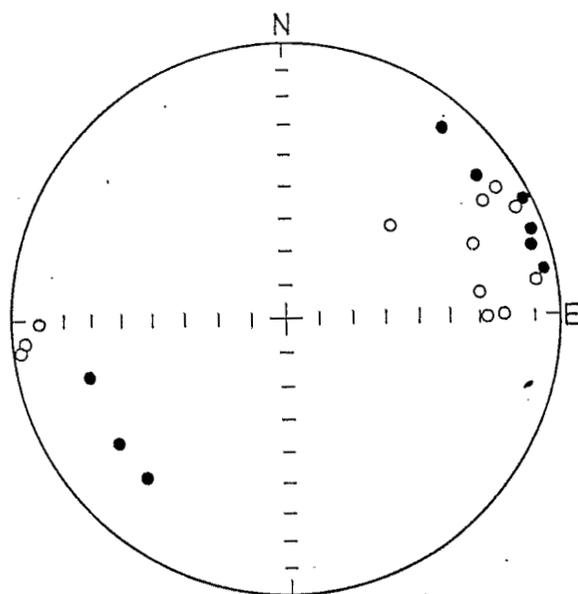


Fig. 6.— Projection sur un canevas sphérique conservant les surfaces (canevas de Wulff) des directions paléomagnétiques après réalisation des corrections de pendage. Cercles vides: projections réalisées sur l'hémisphère supérieur; cercles pleins: sur l'hémisphère inférieur. D'après Roperch *et al.*, 1987.

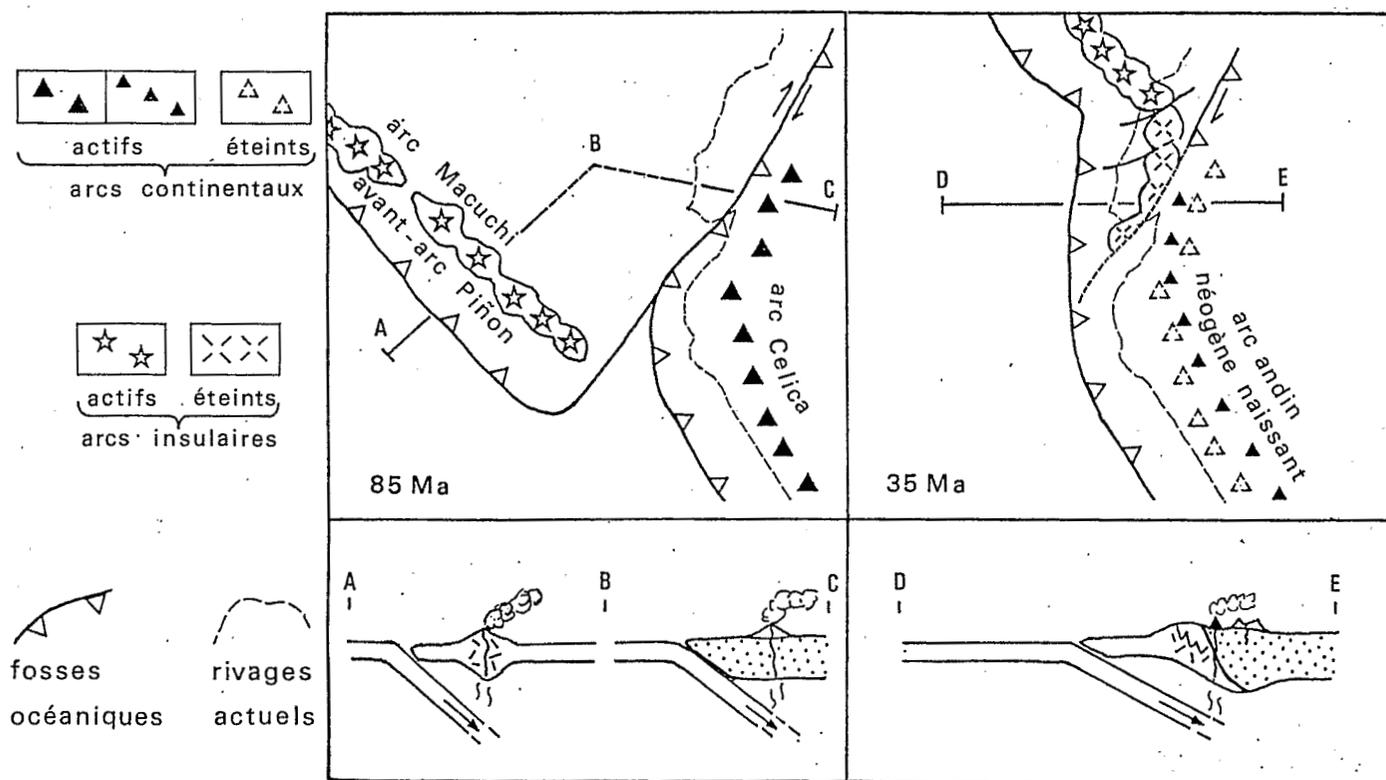


Fig. 7.— Schéma évolutif montrant, en carte et en coupe, les reconstructions proposées pour le sud de la Colombie, l'Équateur et le Pérou pour le Sénonien et pour l'Eocène terminal-Oligocène basal. Ce schéma est très simplifié, car en fait deux arcs insulaires distincts, et non pas un seul, ont été accolés successivement à l'Amérique du Sud au Crétacé terminal-Paléocène inférieur et à l'Eocène terminal-Oligocène inférieur. D'après Roperch *et al.*, 1987.

## DISCUSSION

Tenant compte de l'absence de failles majeures dans la zone côtière équatorienne, nous pensons qu'une rotation d'ensemble affectant un grand bloc côtier et probablement aussi une partie au moins de la Cordillère occidentale rend mieux compte des données paléomagnétiques que des rotations locales dans un régime de failles décrochantes, comme cela a été proposé dans d'autres cas par Nur *et al.* (1986).

Cette considération, ainsi que la nature océanique du substratum Piñon de la côte et le caractère d'arc insulaire de la Formation Macuchi, suggère une origine exotique pour ce que nous appelons le terrain Piñon-Macuchi. L'inclinaison paléomagnétique moyenne des roches de ce terrain, obtenue à partir des données des 21 sites de la côte retenus, indiquerait une paléolatitude approximativement 5° plus au sud que l'actuelle. Le faible déplacement latitudinal que cela implique suggère que la distance entre le terrain Piñon-Macuchi et le continent\*\* n'a jamais été très importante.

En fonction de ces considérations et des données géologiques, nous présentons, dans la figure 7, un modèle évolutif où nous proposons l'existence d'un continent stable, bordé comme aujourd'hui par une zone de subduction océanique plongeant vers l'est, et celle d'une mer marginale, limitée au SW par une zone de subduction intraocéanique se traduisant par l'édification d'un arc insulaire qui est l'arc Macuchi. L'accrétion de ce dernier et de l'aire adjacente d'avant-arc Piñon débute à l'Eocène, lorsqu'un segment suffisant de la "plaque lithosphérique marginale" s'est englouti dans la zone de subduction bordant le continent. En fait, cette "plaque marginale" n'est autre que la plaque caraïbe qui continue ensuite sa migration vers le NNE, puis l'est, jusqu'à atteindre sa position actuelle entre la Mésoamérique, l'arc des Antilles et les failles décrochantes dextres du nord du Vénézuéla (voir p. ex. Mascle, 1985).

En Equateur, le fonctionnement de la zone de subduction bordant le continent a cessé lorsque l'arc Macuchi est arrivé dans la fosse, où il n'a pu être englouti vu sa faible densité relative. La subduction intraocéanique associée à l'arc Macuchi n'avait par contre aucune raison de cesser et, après une période de réajustement de sa géométrie, elle a repris progressivement du sud au nord, à la fois sous le bloc Piñon-Macuchi et sous le continent. L'activité magmatique associée est représentée par les formations volcaniques et plutoniques tertiaires de la marge continentale andine en Equateur et en Colombie.

Ces interprétations mobilistes de la géologie de la partie ouest de l'Equateur (cf. également Feininger et Bristow, 1980; Feininger, 1977) ainsi que celles concernant la Colombie (cf. p. ex. Mc Court *et al.*, 1984; Bourgois *et al.*, 1985, et synthèse de Mégard, 1987) nous montrent que les Andes septentrionales ont une constitution plus proche de celle de la Cordillère nord-américaine — où l'accrétion successive d'"*exotic terranes*" est la cause dominante de la formation de la chaîne montagneuse (p. ex. Jones *et al.*, 1983) — que de celle des Andes Centrales, prototype des chaînes marginales ou andines *stricto sensu*, qui semblent dues essentiellement au processus de subduction de la lithosphère océanique sous la lithosphère continentale.

## Bibliographie

- ASPEN J.A. & McCOURT W.J.  
1986 "Mesozoic oceanic terrane in the central Andes of Colombia", *Geology*, Boulder, 14, p. 415-418.
- AUBOUIN J.  
1972 "Chaînes liminaires (andines) et chaînes géosyncinales (alpines)", 24th Int. Geol. Cong. Montréal, sect. 3 p. 438-461.
- BANERJEE S.K.  
1980 "Magnetism of the oceanic crust; Evidence from ophiolite complexes", *J. Geophys. Res.* 85, p. 3559-3566.

\*\* Notons à ce sujet que du fait des incertitudes concernant les âges des formations rocheuses et de la faible divergence entre les pôles géomagnétiques virtuels tertiaires pour l'Amérique du Sud et l'axe géographique, nous pouvons admettre que le continent est stable c'est-à-dire que les aires cratoniques sud-américaines ne se sont pas déplacées.

- BOURGOIS J., TOUSSAINT J.F., GONZALES H., ORREGO A., AZEMA J., CALLE B., DESMET A., MURCIA A., PABLO A., PARRA E. & TOURNON J.  
1985 "Les ophiolites des Andes de Colombie: évolution structurale et signification géodynamique", In: Mascle A. ed., *Géodynamique des Caraïbes*, Technip., Paris p. 475-493.
- BRISTOW C.R. & HOFFSTETTER R.  
1977 Ecuador — *Lexique stratigraphique international*, V, 5-a2, C.N.R.S., Paris, 413 p.
- BRUET E.  
1949 "Les enclaves des laves des volcans de Quito, République de l'Equateur", *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 19, 477-491.
- CANDE S.C. & LESLIE R.B.  
1986 "Late Cenozoic tectonics of the Southern Chile trench", *J. Geophys. Res.*, 91, B1, 471-496.
- EGUEZ A.  
1986 "Evolution cénozoïque de la Cordillère Occidentale septentrionale d'Equateur (0°15' S à 1°10' S). Les minéralisations associées" (Thèse 3e cycle, U.P. et M. Curie, Paris) 116 p. En dépôt à la Soc. Géol. de France.
- FAUCHER B. & SAVOYAT E.  
1973 "Esquisse géologique des Andes de l'Equateur", *Rev. Geogr. Phys. Géol. Dyn.* 15, 115-142.
- FEININGER T.  
1982 "The metamorphic "basement" of Ecuador", *Geol. Soc. Am. Bull.*, Boulder, 93, p. 87-92.  
1987 "Allocthonous terranes in the Andes of Ecuador and northwestern Peru," *Can. J. Earth Sci.*, 24, p. 266-278.
- FEININGER T. & BRISTOW C.R.  
1980 "Cretaceous and Paleogene geologic history of coastal Ecuador", *Geol. Rdsch. Stuttgart*, 69, p. 849-874.
- FEININGER T. & SEGUIN M.K.  
1983 "Simple Bouguer gravity anomaly field and the inferred crustal structure of continental Ecuador", *Geology*, 11, p. 40-44.
- FOX P.J. & OPDYKE N.D.  
1973 "Geology of the oceanic crust: Magnetic properties of oceanic rocks", *J. Geophys. Res.* 78, p. 5139-5154.
- GOOSSENS P.J. & ROSE W.I.  
1973 "Chemical composition and age determination of tholeiitic rocks in the Basic Igneous Complex, Ecuador", *Bull. Geol. Soc. Am.* 84, p. 1043-1052.
- GOOSSENS P.J., ROSE W.I. & FLORES D.  
1977 "Geochemistry of tholeiites of the Basic Igneous Complex of northwestern South America", *Bull. Geol. Soc. Am.*, 88, p. 1711-1720.
- HALL M.L. & CALLE J.  
1982 "Geochronological control for the main tectonic-magmatic events of Ecuador", *Earth. Sci. Rev.*, 18, p. 215-239.
- HENDERSON W.G.  
1979 "Cretaceous to Eocene volcanic arc activity in the Andes of northern Ecuador", *J. Geol. Soc. London*, p. 367-378.
- HERBERT H.T.  
1983 "Die kristallinen Gesteine aus der nördlichen Hälfte der E-Kordillera Ecuadors", *Geotekt. Forsch.*, 65, 1-77.
- JONES D.L., HOWELL F.G., CONEY P.J. & MONGER J.W.H.  
1983 "Recognition, character and analysis of tectonostratigraphic terranes in western North America", In M. HASHIMOTO et S. UYEDA, *Accretion tectonics in the circum-Pacific regions*, Reidel Publ. Co., Boston, p. 21-36.
- JUTEAU T., MÉGARD F., RAHARISON L. & WHITECHURCH H.  
1977 "Les assemblages ophiolitiques de l'occident équatorien", *Bull. Soc. Géol. Fr.* 18, p. 1127-1132.
- KENNERLEY J.B.  
1980 "Outline of the geology of Ecuador", *Overseas Geol. and Miner. Resour.*, London, 55, 17 pp.
- LEBRAT M.  
1985 *Caractérisation géochimique du volcanisme antéorogénique de l'Occident équatorien: implications géodynamiques* Doc. Trav. Centre Geol. Géophys., Montpellier 6; 118 p.
- LEBRAT M., MÉGARD F., JUTEAU T. & CALLE J.  
1985 "Pre-orogenic volcanic assemblages and structure in the Western Cordillera of Ecuador between 1°40'S and 2°20'S", *Geol. Rdsch.*, 74, p. 343-351.
- LEBRAT M., MÉGARD F., DUPUY C. & DOSTAL J.  
1986 "Geochemistry of Cretaceous volcanic rocks from Ecuador: Geodynamic implications", *Geol. Soc. Am. Bull.*, Boulder, sous presse.
- MASCLE A., BLJU-DUVAL B., BLANCHET R. & STEPHAN J.F.  
1985 *Géodynamique des Caraïbes*, Technip, Paris.

Mc COURT W.J., ASPDEN J.A. & BROOK J.M.

1985 "New geological and geochronological data from the Colombian Andes: Continental growth by multiple accretion", *J. Geol. Soc. London*, 141, 831-845.

MÉGARD F.

1984 "Andine (chaîne)" *In: Encyclopaedia Universalis*, Paris, 2de ed., p. 80-84.

1987 "Cordilleran and marginal Andes; a review of Andean geology north of the Arica Elbow (18°S)" *In* J.W.H. MONGER et J. FRANCHETEAU, eds. *Circum-Pacific orogenic belts and the evolution of the Pacific Ocean basin*. Amer. Geophys. Union, Geodyn. Ser., Washington, sous presse.

MÉGARD F. & LEBRAT M.

1986 "Los terrenos exóticos del Occidente ecuatoriano y sus relaciones con Suramérica", *In: Actas del Coloquio Ecuador 86*, Quito, sous presse.

MOURIER T., LAJ C., MÉGARD F., ROPERCH P. & MITOUARD P.

1987 An exotic terrane in northern Peru? (en prep.)

MOURIER T., MÉGARD F., REYES L. & PARDO-ARGUEDAS A.

1987 "L'évolution mésozoïque des Andes de Huancabamba (Nord-Pérou, Sud-Equateur) et l'hypothèse de l'accrétion du bloc Amotape-Tahuin" (soumis au *Bull. Soc. Géol. Fr.*)

NUR A., RON H. & SCOTTI O.

1986 "Fault mechanics and the kinetics of block rotations", *Geology*, 14, p. 746-749.

PILGER R.H.

1983 "Kinematics of the South American subduction zone from global plate reconstruction", *In: Geodynamics of the eastern Pacific region, the Caribbean and the Scotia Arc*, ed. Cabré, *Amer. Geophys. Un., Geodyn. Ser.*, 9, pp. 113-125.

ROPERCH P., MÉGARD F., LAJ C., MOURIER T., CLUBE T. & NOBLET Ch.

1987 "Rotated oceanic blocks in western Ecuador", *Geophys. Res. Lett.*, Washington, sous presse.

ZEIL W.

1979 *The Andes: a geological review*. Geb. Borntraeger, Berlin, 260 p.

Bull. Inst. Fr. Et. And.

ERRATA

1986, XV, No. 3-4, pp. 61-72

Pág. 61, en la nota de pie de página, léase únicamente: Instituto Nacional de Antropología. Calle 3 de Febrero No. 1370/78. 1426 Buenos Aires, Argentina.