



HAL
open science

The Neogene fluvial systems of the Ecuadorian foreland basin and dynamic inferences

Frédéric Christophoul, Patrice Baby, Jean-Claude Soula, Michel Rosero, José Burgos

► **To cite this version:**

Frédéric Christophoul, Patrice Baby, Jean-Claude Soula, Michel Rosero, José Burgos. The Neogene fluvial systems of the Ecuadorian foreland basin and dynamic inferences. *Comptes Rendus Géoscience*, 2002, 334 (14), pp.1029-1037. 10.1016/j.crte.2002.14.003 . hal-00672393

HAL Id: hal-00672393

<https://hal.science/hal-00672393>

Submitted on 2 Mar 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Les ensembles fluviaux néogènes du bassin subandin d'Équateur et implications dynamiques

The Neogene fluvial systems of the Ecuadorian Foreland basin and dynamic inferences

Frédéric Christophoul^a, Patrice Baby^b, Jean-Claude Soula^c, Michel Rosero^d, José Burgos^{b,c}

^a Musée régional de géologie Pierre-Vetter, av. Paul-Ramadier, 12300 Decazeville, France

^b IR D, UR 104, 38, rue des Trente-Six-Ponts, 31400 Toulouse, France

^c Laboratoire de dynamique des bassins sédimentaires, 38, rue des Trente-Six-Ponts, 31400 Toulouse, France

^d Oxy Ecuador, Quito, Équateur

Reçu le 28 janvier 2002 ; accepté le 5 août 2002

Présenté par Jean Dercourt

Comptes Rendus Geoscience, 334 (2002), 1029-1037

Abstract – The Neogene fluvial systems of the Ecuadorian foreland basin and dynamic inferences. A sedimentological study of the Neogene continental infill of the Subandean foreland basin of Ecuador led us to define an evolution of the fluvial system from an alluvial plain to an alluvial fan with an increasing slope in the same time as the drainage changed from mostly longitudinal to transverse. Combined with the data presently available on palaeotopography, exhumation, tectonic evolution and geomorphology, these results enable us to infer that, in contrast with the other Subandean foreland basins of Bolivia and Peru, the progradation of the Neogene alluvial fans proceeded by an overall expansion, associated with a relatively small tectonic shortening and not as a result of the development of successive thrust-related depocentres. This also indicates that the surrection of the Cordillera progressed in Ecuador throughout the Neogene.

fluvial sedimentology / alluvial fans / Subandean basin / Neogene / Ecuador

Résumé – Une étude sédimentologique du remplissage continental néogène du bassin subandin d'Équateur nous a permis de mettre en évidence le fait que le système fluvial ait évolué d'une plaine alluviale à un éventail alluvial à pente de plus en plus forte, en même temps que le drainage passait de longitudinal à transverse. Combinés avec les données actuellement disponibles sur la paléotopographie, l'exhumation, l'évolution tectonique et la géomorphologie, ces résultats montrent qu'au contraire des bassins d'avant-pays subandins de Bolivie et du Pérou, la progradation des cônes alluviaux néogènes s'accomplissait par une expansion d'ensemble dans un contexte de raccourcissement faible, plutôt qu'à la suite du développement de dépocentres successifs, contrôlés par des chevauchements. Ils montrent aussi que la surrection de la cordillère s'est poursuivie durant tout le Néogène.

sédimentologie fluviale / cônes alluviaux / bassin subandin / Néogène / Équateur

Abridged version

1. Introduction

The sedimentary signature of structural events in foreland basins has been widely described for the past ten years

[6, 10, 20], particularly in the Alpine Molasse basin [14, 25, 27]. The authors agree that the fluvial systems at first developed with an axial drainage, which changed to a transverse drainage [6, 14, 20, 27] as a result of either thrust sheets stacking near the inner margin of the basin or post-compressional erosional unloading [5, 6, 12, 20, 26].

In this paper, we study the Ecuadorian Subandean foreland basin (Oriente Basin) [1, 4, 19, 29] (Fig. 1), which was filled by fluvial deposits since the end of the Oligocene by means of lithofacies and architectural element analyses using Miall's nomenclature [22] and palaeocurrent measurements. The results of this study will be then combined with the data available on palaeoaltitudes, exhumation, tectonic evolution, and geomorphology, and compared with the other Subandean basins of the central Andes.

2. Stratigraphy

The stratigraphy of the deposits of the Ecuadorian Oriente basin is rather well known, although biostratigraphic markers are scarce [4, 29]. Four formations have been recognised: the Chalcana Formation of Upper Oligocene through Miocene age [1, 9], the Arajuno Formation of Upper Miocene age [1, 4, 24, 29], the Chambira Formation of Upper Miocene through Pliocene age, and the Mesa/Mera Formations [4, 29] of Pleistocene age [3, 21, 24, 29]. The Curaray Formation [4, 29] is the easterly equivalent of the Arajuno [3] and Chambira [24] Formations. All these formations were deposited within a single depocentre, east of the Pastaza depression (Fig. 1). Maximum subsidence rates for the Chalcana, Arajuno and Chambira Formations are 86, 162, and 336 mMa^{-1} , respectively.

3. Sedimentology of fluvial deposits

3.1. Chalcana Formation

The Chalcana Formation (Fig. 2a) mostly crops out along the Río Aguarico. The main part of the formation is made of reddish shales intercalated with rare fine-grained and thin sandstone beds. No sedimentary structures have been observed. The lithofacies [22] are Fr and P in the shales and Sh and St in the sandstones. These lithofacies can be grouped in architectural elements FF (floodplain fines) and CR (crevasse channels). Near-symmetrical channels with lithofacies St are occasionally observed. Such an association may characterise the inter-distributary (inter-river) part of a low-sinuosity sandy meandering or anastomosing river system [22], similar to the present-day Amazonian plain [24]. Palaeocurrent measurements (Fig. 3A) show two main directions NW–SE and north–south, which may be interpreted as transverse river systems perpendicular to the Andean protocoastline, debouching into river systems parallel to it.

3.2. Arajuno Formation

The Arajuno Formation (Fig. 2b) mostly crops out along the Río Napo. It is essentially made of fine- to coarse-grained sandstones and conglomerates (lithofacies St, Sh, Gh, Gp and Gs) interbedded with minor siltstone beds (Fl, P). These lithofacies can be grouped into architectural elements LA (lateral accretion) and DA (downstream accretion), which indicates migrating sandy bars. These lithofacies and architectural elements can be interpreted as the distal part of gravel-wandering rivers. Palaeocurrent

measurements (Fig. 3B) indicate two drainage directions: WNW–ESE to west–east and north–south, as in the Chalcana Formation. The longitudinal drainage axis, however, appears now to have been shifted eastward.

3.3. Chambira Formation

The Chambira Formation crops out along the Pastaza depression and the Río Napo (Fig. 2c). Most of the formation is made up of quartz pebbles-bearing conglomerates included in a quartz-rich argillaceous matrix [29]. The basal part contains lithofacies Gt and Gms. The upper part is composed of conglomerates grading up to sandstones and siltstones (lithofacies Gh, St, Sr and Dr). These assemblages can be interpreted as the expression of high-energy gravel-braided rivers with frequent mudflows [22]. Palaeocurrents (Fig. 3C) indicate main flow directions, ranging from SW–NE to east–west, i.e., transverse drainage.

3.4. Curaray Formation

The Curaray Formation appears as the easterly equivalent of both the Arajuno and Chambira formations [3]. This formation is made up of sandy to silty tuffites (lithofacies St), containing conglomerates and marl tuffites [4], which indicates an estuarine environment. As commonly observed in estuarine environments, no marked preferred palaeoflows are observed.

3.5. Mesa/Mera Formation

The Mesa/Mera Formation crops out along the Río Pastaza and Aguarico (Fig. 2d). Near the apex of the present-day Pastaza fan, this formation comprises coarse conglomerates with lithofacies Gmm to Gmg (debris flow deposits), where volcanic pebbles (> 85%), included in a tuffaceous matrix, are predominant. Boulders of granite and gneiss (> 1 m) are also observed [29]. Eastward, the conglomerates are less coarse and form stacked shallowly symmetrical channels with lithofacies Gt (Fig. 2d). These deposits are interpreted as representing gravel-braided rivers lacking mudflow deposits in their distal part, similar to the present Río Pastaza. Palaeocurrent data (Fig. 3D) indicate an east–west mean flow direction in the west, diverging to SW–NE and NW–SE in the east. Together, these data indicate a typical alluvial fan drainage system similar to that observed today.

4. Discussion and conclusions

Overall, the sedimentological study of the fluvial deposits constituting the Neogene in the Ecuadorian Subandean Basin reveals that the fluvial system evolved from an alluvial plain (Chalcana Formation) to an alluvial fan (Formations Chambira and Mesa/Mera), in the same time as the drainage changed from mostly longitudinal to transverse, i.e., from underfilled to overfilled *señal* Jordan [20]. When considering that climate remained fairly wet during this period [15], the increase in stream power recorded by this evolution can be ascribed to an

increase in slope as, for example, in the Alpine molasses [14]. This agrees with Delfaud et al. [10], who demonstrated that the Cordillera was less than 1000 m high at the end of the Oligocene, and with Spikings et al. [28], who observed high exhumation rates in the Early and Late Miocene, which show that the ratio uplift/erosion was positive (pre-steady state). A similar increase in stream power with time has been recognised in the Neogene Subandean basin of Bolivia [16]. However, in contrast with the Subandean basins of Bolivia, Peru, and Colombia, which formed several deep centres progressively integrated into the orogenic wedge during the eastward propagation of the thrust system, the deposition of the Neogene in Ecuador occurred in a single deep centre, with a moderate subsidence rate, at least until the Late Pleistocene. The present-day uplift of the Ecuadorian Subandean Basin evidenced by the strong incision of the pre-Holocene formations studied herein by the present-day rivers [3, 23] indicates that the uplift seems

to exaggerate today, causing the Subandean zone to pass from the domain of long-term deposition to that of predominant incision, while the Subandean basins of Bolivia, Peru and Colombia continue to accumulate sediments. Again, the overall shortening of the Subandean zone was considerably smaller in Ecuador [7, 19] than in Bolivia and Peru [11, 13] and Colombia [8], and no evidences of the growth of the Subandean front are recorded in the deposits. The evolution of the drainage pattern and the eastward progradation of the alluvial fans revealed by the present study [2] thus appears to have been a result of an expansion of the fans unrelated to either a forward migration of the orogenic front or an increase in tectonic shortening in the inner margin of the basin, as commonly admitted [16, 20, 27]. Another origin, such as erosion and unloading [6] or a deep-seated process related to the special situation of Ecuador, is thus to be researched (study in progress).

1. Introduction

La signature sédimentaire des phénomènes structuraux dans les bassins d'avant-pays a été largement décrite au cours de ces dernières années [6, 10, 13, 20, 25, 27]. Les différents auteurs s'entendent sur le fait que, dans l'histoire de leur mise en place, les systèmes fluviaux se développent dans un premier temps avec un drainage parallèle à la chaîne (drainage axial) [14, 27], ou stade sous-alimenté *sensu* Jordan [20], pour ensuite évoluer vers un système à drainage perpendiculaire à la chaîne (drainage transversal pour Burbank [6], stade suralimenté pour Jordan [20]). Les phénomènes fréquemment invoqués pour expliquer ce type d'évolution sont : (1) une flexion continentale [5], suivie d'un sur-remplissage, résultant d'un empilement de structures chevauchantes progressive ment érodées en bord de bassin [26], impliquant l'approfondissement du bassin et éventuellement la migration du deep centre vers l'intérieur de l'orogène [20] ou vers le craton [9] ; (2) une surrection générale de l'orogène, due à l'érosion post-tectonique des structures chevauchantes [6], avec la création d'un *foresag* en position distale [12].

Le rétro-bassin d'avant-pays des Andes équatoriennes (bassin Oriente [4, 19, 29], Fig. 1) est le siège d'une sédimentation fluviale depuis la fin de l'Oligocène [4, 27] et montre à l'heure actuelle un éventail alluvial. Les dépôts néogènes qui remplissent ce bassin afflèrent essentiellement dans la zone subandine et présentent de bonnes conditions de préservation, du fait de la faible déformation qui affecte le bassin Oriente [1, 7].

L'objet de cet article est de caractériser les paléoréseaux fluviaux d'un point de vue sédimentologie

des faciès [22], paléocourants et géométrie des corps sédimentaires, pour proposer un modèle d'évolution en relation avec les données structurales, sédimentaires et de paléoaltitudes connues, tant dans les bassins Oriente et adjacents [10, 11, 13, 17, 18] que dans la cordillère orientale des Andes équatoriennes [11, 28].

2. Stratigraphie

La stratigraphie du Néogène du bassin Oriente est aujourd'hui bien décrite. Le découpage stratigraphique retenu est en grande partie repris de ceux de Tschopp [29] et de Baldock [4], précisé par l'IRD-Petroproducción [3]. Il comprend quatre formations continentales distinctes, séparées par des discordances angulaires (Fig. 1). La formation Chalcana est d'âge Oligocène supérieur à Miocène [2, 9]. La formation Arajuno est d'âge Miocène supérieur [2, 4, 24, 29]. La formation Chimbira est d'âge Miocène supérieur à Pliocène. La formation Mesa/Mera est d'âge Pliocène supérieur [21]. La formation Curaray [4, 29] est l'équivalent latéral marin des formations Arajuno [3] et Chimbira [24].

3. Sédimentologie des ensembles fluviaux

Les dépôts du bassin Oriente afflèrent essentiellement sur le flanc est des deux culminations subandines (Napo au nord et Cutucú au sud) et plus à l'est, grâce à des incisions pratiquées par les principaux cours d'eau (río Napo, Pastaza et Aguarico). Elles sont déposées avec un unique deep centre situé à l'est

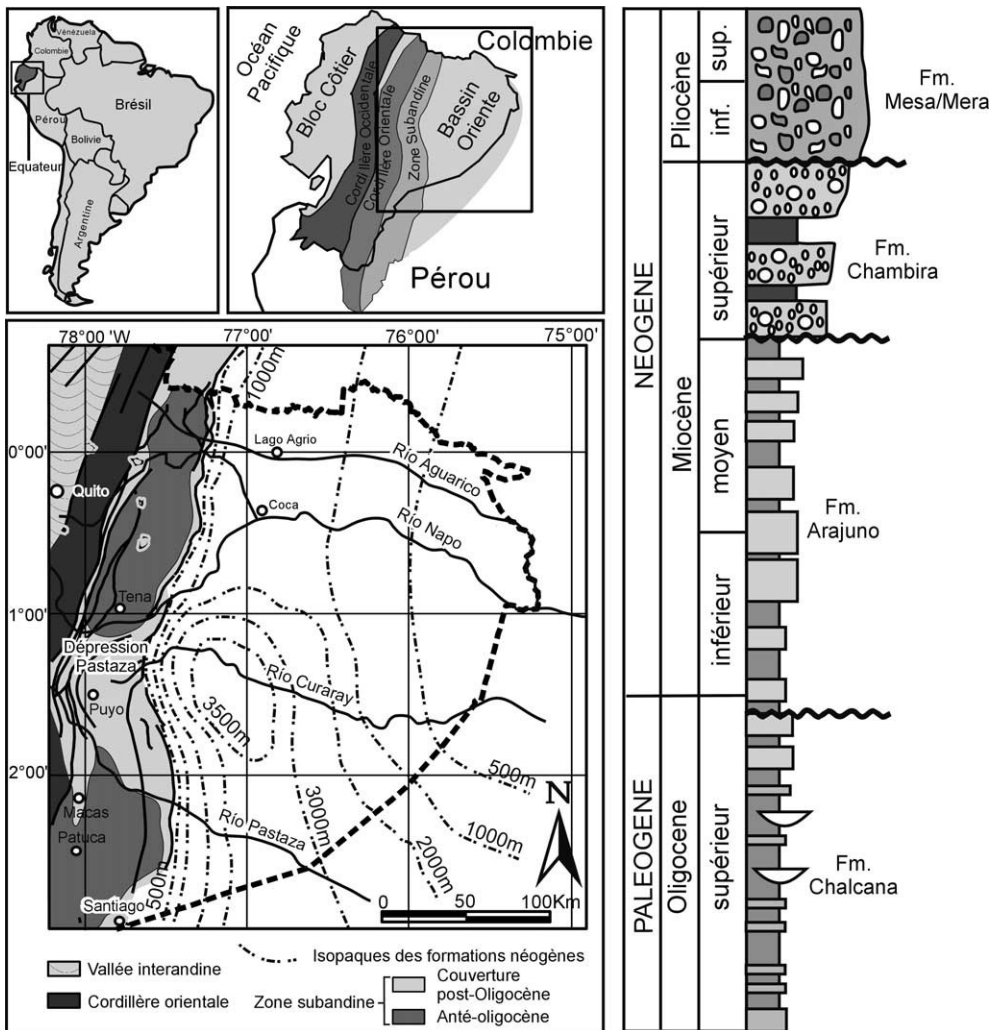


Fig. 1. En haut à gauche, localisation de la région étudiée. En bas à gauche, carte structurale simplifiée du bassin subandin d'Équateur (modifiée d'après Baby et al. [1]; isopaques d'après Rosero [24]). À droite, colonne stratigraphique des formations étudiées.

Fig. 1. Top left, location map of the studied area. Bottom left, simplified tectonic map of the Subandean basin of Ecuador (modified from Baby et al. [1]; isobaths after Rosero [24]). Right, stratigraphic column of the studied formations.

de la « dépression Pastaza » (Figs. 1 et 3). Les vitesses de subsidence maximales pour les formations Chalcana, Arajuno et Chambira sont respectivement de 86, 162 et 336 mMa^{-1} . Les formations seront décrites selon la nomenclature de Miall [22].

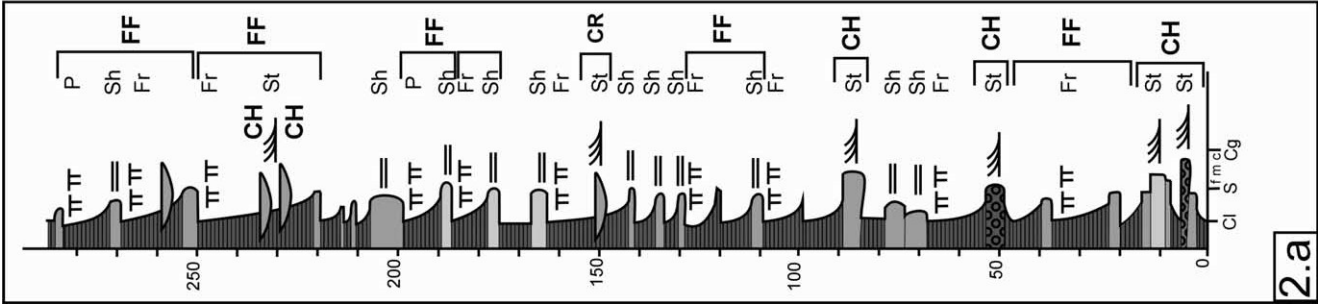
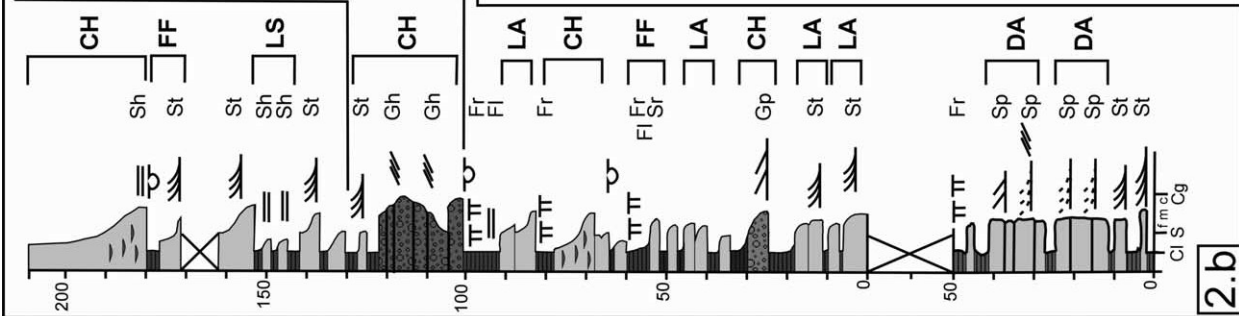
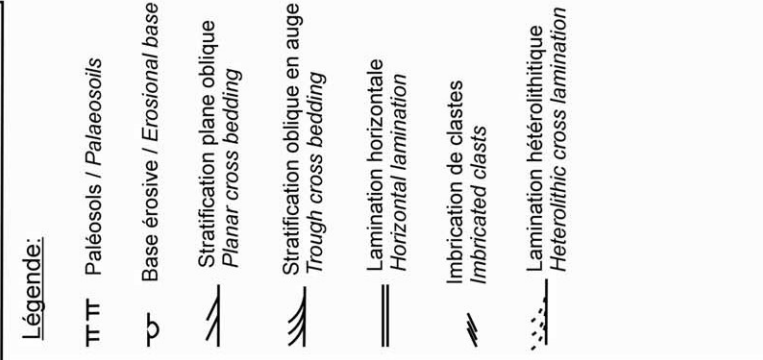
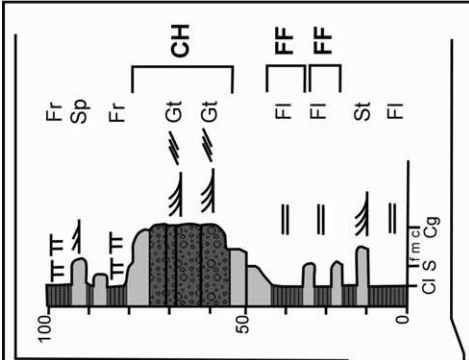
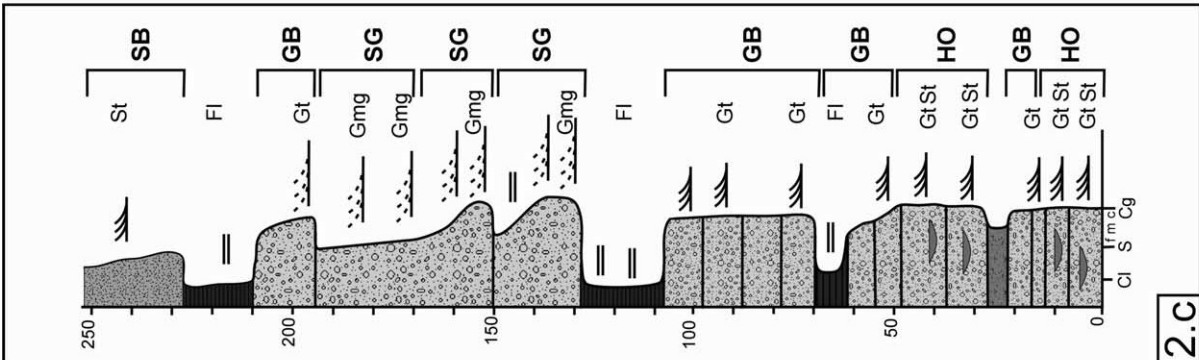
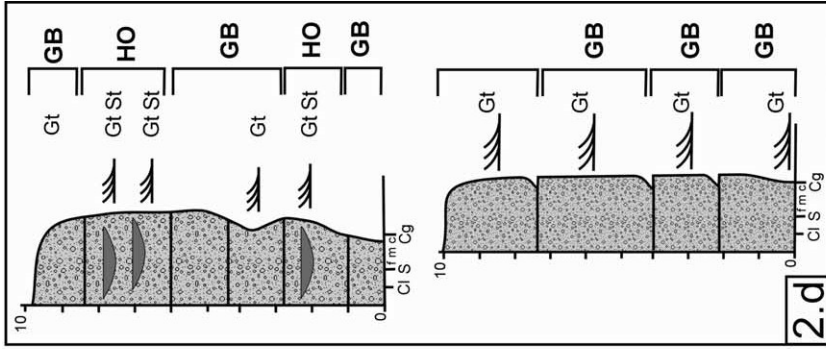
3. 1. Formation Chalcana

La formation Chalcana affleure essentiellement le long du río Aguarico (Fig. 2a). La granulométrie est généralement très fine. L'essentiel de la coupe est constitué d'argilites rouges à racines (lithofaciès Fr),

qui présentent de fréquentes marmorisations, caractérisant des paléosols (lithofaciès P). Les niveaux de grès présents le long de la coupe sont en général fins à moyens et très rarement grossiers. Les niveaux les plus fins ne présentent pas de structure sédimentaire. Les niveaux de grès moyens montrent le plus souvent une lamination plane parallèle (Sh) ou des stratifications obliques en auge (St). On peut noter, dans les argilites, des niveaux de grès fins disposés en lentilles plan convexes (chenaux de crevasses). Ces lithofaciès peuvent être groupés en éléments architecturaux de

Fig. 2. Colonnes sédimentologiques des formations du bassin subandin d'Équateur. **a.** Formation Chalcana. **b.** Formation Arajuno. **c.** Formations Chambira et Curaray. **d.** Formation Mesa/Mera. Éléments architecturaux d'après Miall [19] : **FF**, dépôts de plaines d'inondation; **DA**, barre d'accrétion longitudinal; **LA**, barre d'accrétion latérale; **CH**, fond de chenal; **GB**, barre de graviers; **HO**, chenal de confluence; **SG**, debris flow.

Fig. 2. Sedimentological columns of the Ecuadorian Subandean Basin. **a.** Chalcana Formation. **b.** Arajuno Formation. **c.** Chambira and Curaray Formations. **d.** Mesa/Mera Formation. Architectural elements, after Miall [19]: **FF**, floodplain fines, **DA**, downstream accretion macroforms, **LA**, lateral accretion macroforms, **CH**, channels, **GB**, Gravel Bar, **HO**, Hollow Scour, **SG**, Sediment Gravity flow.



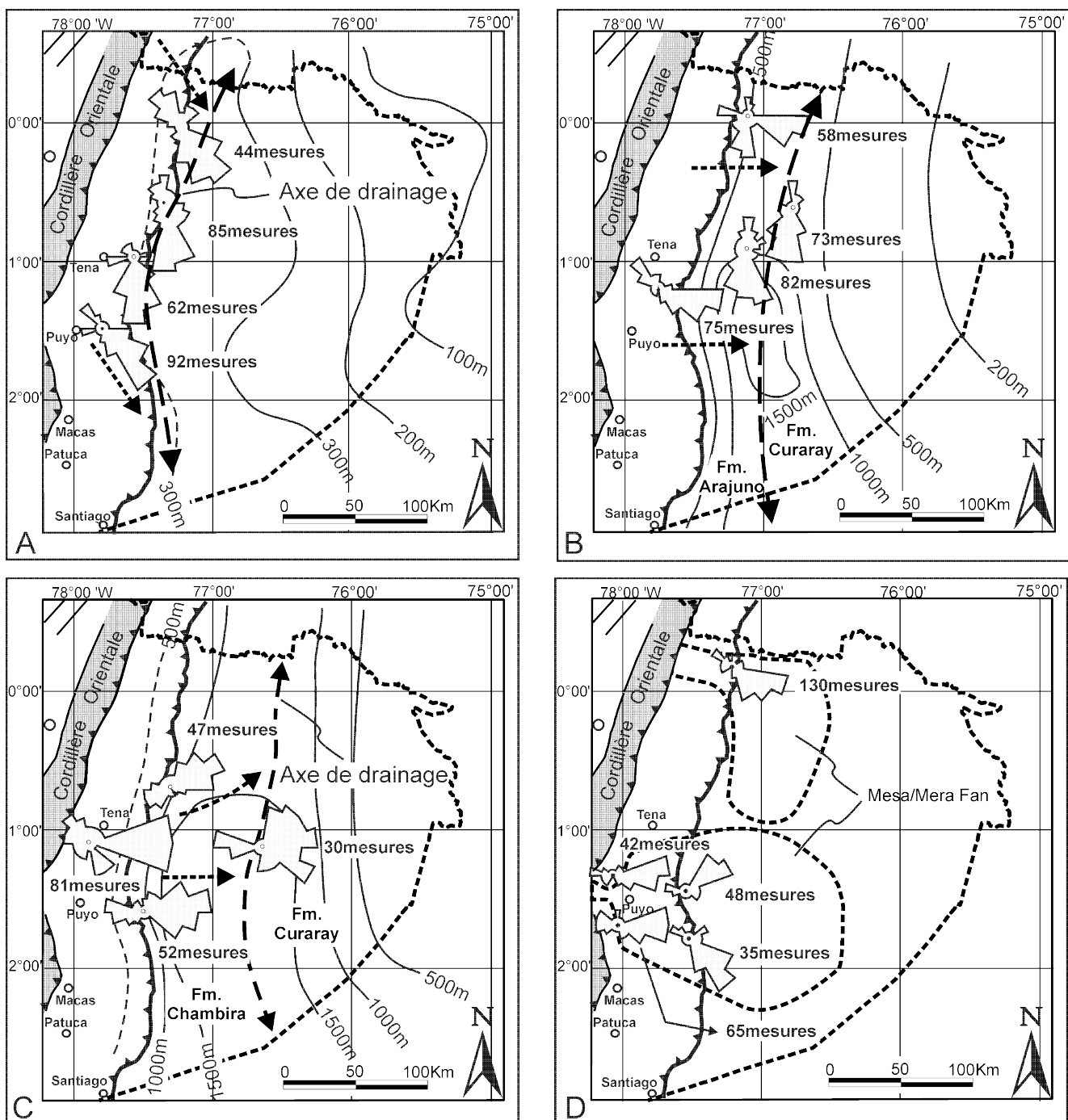


Fig. 3. Cartes de paléocourants et isopaches des formations du bassin subandien d'Équateur. **A.** Formation Chalcaná. Vitesse de subsidence maximale de 86 mMa^{-1} . **B.** Formation Arajuno/ Curaray. Vitesse de subsidence maximale de 162 mMa^{-1} . **C.** Formations Chambi ra/ Curaray. Vitesse de subsidence maximale de 336 mMa^{-1} . **D.** Formation Mesa/ Mera. Les flèches indiquent les paléocourants. La ligne brisée en **A**, **B** et **C** indique l'axe de drainage principal. Les frontières de l'Équateur sont indiquées en tirets.

Fig. 3. Palaeocurrent and isopach maps of the formations of the Ecuadorian Subandean Basin. **A.** Chalcaná Formation. Maximum subsidence rate of 86 mMa^{-1} . **B.** Arajuno/ Curaray Formation. Maximum subsidence rate of 162 mMa^{-1} . **C.** Chambi ra/ Curaray Formation. Maximum subsidence rate of 336 mMa^{-1} . **D.** Mesa/ Mera Formation. Arrows indicate palaeocurrents. Broken lines in **A**, **B**, and **C** indicate drainage axes. The Ecuadorian border is delineated by a dashed line.

type FF (épandage de crevasse, plaine d'inondation) et C R (chenaux de crevasse). Les dépôts de la formation C halcana sont ainsi dominés par des corps sédimentaires, correspondant à des assemblages de plaine d'inondation. Quelques chenaux symétriques peu profonds à rem plissage fin (C H) s'intercalent dans ces dépôts de plaine d'inondation. Ce type d'assemblage suggère des cours d'eau de type méandrique sableux ou anastomosé [22], à faible sinuosité, comme l'indique la présence de chenaux symétriques. L'ensemble semble montrer une plaine alluviale semblable à la plaine amazone actuelle [23]. L'analyse des paléocourants en plusieurs points (Fig. 3A) de la zone subandine montre deux maxima: NW-S E dans la zone subandine et nord-sud au voisinage du front subandin. Ces directions traduisent un drainage perpendiculaire à la proto-cordillère [7] se déversant, vers l'est, dans un axe de drainage parallèle à la chaîne (Fig. 3A).

3. 2. Formation A rajuno

La formation Arajuno affleure surtout sur le río Napo et ses affluents (Fig. 2b). La coupe est pour l'essentiel composée de grès fins à grossiers et de conglomérats. Des argilites rouges, intercalées, sont moins fréquentes que dans la formation C halcana. Les corps conglomératiques présentent des lithofaciès de type Gh (grains jointifs à litage horizontal), mais plus souvent Gt et Gp (stratifications obliques en auge et planes), et constituent des rem plissements de chenaux (type C H) symétriques et peu profonds. La composition de ces conglomérats montre la prédominance des galets de quartz (> 90%). Les grès sont également quartzeux et en général grossiers. Les lithofaciès les plus fréquents sont St et Sh et se trouvent au sein de barres sableuses migrant latéralement et longitudinalement (LA et DA). Les argilites complétant la coupe sont massives (Fsm), généralement rouges à lie de vin, montrant peu d'indices de pédogenèse. L'ensemble peut être interprété comme la signature d'un réseau de cours d'eau divergent de type *Gravel Wandering* [22], dans la mesure où la symétrie des chenaux semble peu compatible avec un type méandrique et où les éléments caractéristiques de migration d'intrados de méandres sont absents. La forte proportion de grès laisse supposer qu'il s'agit de la partie distale d'un système fluvial de ce type, qui présente classiquement des faciès plus grossiers. Le système de la formation Arajuno peut ainsi représenter un réseau hydrographique présentant une pente plus forte que celui de la formation C halcana et inclus dans un cône alluvial.

Les données de paléocourants montrent une direction de drainage transverse (ouest-est; NW-SE à ouest-est) et localement longitudinale (tributaires la-

téraux?) à l'ouest et longitudinale (nord-sud) à l'est (Fig. 3B). Ce dispositif est comparable à celui de la formation C halcana, mais l'axe de drainage, parallèle à la chaîne, se déplace vers l'est.

3. 3. Formation Ch ambira

La formation Chambira (Fig. 2c) affleure dans la zone subandine, au niveau et au nord de la dépression Pastaza et le long du río Napo (Fig. 1). La stratification est renversée sous le chevauchement bordier du granite jurassique d'Abitagua; son pendage devient normal et de plus en plus faible vers l'est et le haut, montrant ainsi une disposition en discordance progressive. Les conglomérats contiennent des clastes de quartz, d'origine filonienne à plus de 90%, dans une matrice argilo-gréseuse très riche en quartz. Les clastes de granite sont absents, ce qui traduit l'importante altération du granite d'Abitagua. La base de la coupe est faite de bancs de conglomérats massifs. Les lithofaciès sont essentiellement de type Gt. Certains niveaux se présentent sous la forme de galets emballés dans une matrice argileuse (Gmg), indiquant des coulées de débris. Le reste de la coupe est constitué d'une succession de séquences de comblement de chenaux, incluant des faciès Gt, Gh, St et Sr, avec parfois, en somme et de séquences de lithofaciès Fr. Ces agencements caractérisent un système fluvial à haute énergie, avec de fréquentes coulées boueuses. La faible dévlopement des faciès de plaine d'inondation indique aussi un système à fort flux sédimentaire régulier. Ces associations de lithofaciès peuvent être interprétées comme caractéristiques de cours d'eau en tresses de type *Gravel-Bed Braided* [22]. Les paléocourants (Fig. 3C) indiquent une direction SW-NE à ouest-est.

3. 4. Formation C uraray

La Formation Curaray est l'équivalent latéral, vers l'est, des formations Chambira et Arajuno [2, 24] mais n'affleure que de manière très discontinue. Elle est formée de tidalites grés-silteuses à séquences gradocroissantes (lithofaciès St), contenant une macrofaune (crocodiliens, tortues marines), qui permet de définir un environnement estuarien [4]. Les données de paléocourants montrent des directions très variables, traduisant probablement la présence de courants marins multidirectionnels.

3. 5. Formation Mesa/Mera

La formation Mesa/Mera affleure de manière discontinue le long des ríos Pastaza et Aguarico, où elle constitue deux cônes alluviaux distincts. Près de l'apex du cône Pastaza actuel, le matériel est conglomératique grossier et les coulées de débris sont fré-

quentes (lithofaciès Gmm et Gmt). Les clastes sont majoritairement des roches volcaniques (> 85%), mais aussi du quartz (~ 10%) et des roches métamorphiques (~ 5%). Des blocs granitiques et gneissiques (> 1 m) ont été localement observés [4], ce qui laisse supposer que l'apex du cône n'a pas bougé. Vers la partie distale du cône, les bancs de conglomérats grossiers sont d'épaisseur métrique, avec des lithofaciès Gt. Les clastes de même composition qu'à l'ouest sont ici bien roulés, avec une sphéricité élevée. Ces dépôts montrent un empilement de chenaux symétriques peu profonds (2–3 m pour une largeur de 10 à 20 m) et les coulées boueuses sont absentes. Ce type d'agencement peut être interprété comme résultant de cours d'eau en tresses de type *Gravel-braided* [22], caractérisés par des dépôts grossiers et des chenaux faiblement incisés, semblables à ceux déposés par les ríos Pastaza et Aguarico actuels. Les paléocourants montrent un maximum ouest-est près du front subandin. Vers l'est, les directions se disposent en éventail, à l'image du cône Pastaza actuel [2].

4. Discussion et conclusion

La caractérisation sédimentologique des dépôts du bassin subandin d'Équateur montre tout d'abord que, durant la période considérée, les systèmes fluviaux évoluent d'une plaine alluviale (formation Chalcana) à un cône alluvial semblable au cône actuel, avec des cours d'eau à courant de plus en plus puissant. Si l'on considère que le climat de la zone est resté très humide (cf. discussion in [15]), on peut interpréter l'accroissement de la puissance du courant comme le résultat d'une augmentation de la pente moyenne des cônes fluviaux, à l'image des molasses alpines [14]. Cette hypothèse est en grande partie confirmée par les travaux sur la minéralogie des argiles [10], qui ont montré qu'à la fin de l'Oligocène, la protomontagne était en grande partie érodée (moins de 800 m). L'exhumation mise en évidence par les traces de fission [19, 28], mais aussi par la présence, pour la première fois, de clastes de granite dans Mesa/Mera, accompagnait donc une surrection supérieure à l'érosion (« stade pré-stationnaire»). Les paléocourants montrent que l'augmentation de la pente s'accompagnait

d'une progradation vers l'est des cônes alluviaux. En même temps, le réseau hydrographique passait progressivement d'un drainage transversal, débouchant dans un système de drainage parallèle aux Andes (formations Chalcana et Arajuno) et peut-être à la ligne de rivage (formation Curaray), caractéristique d'un bassin d'avant-pays sous-alimenté *sensu* Jordan [20], à un drainage strictement transversal (formation Chalcana), caractéristique d'un bassin suralimenté, aboutissant directement à une dépression marine (formation Curaray), elle-même recouverte par l'expansion du cône alluvial (formation Mesa/Mera). Le soulèvement du bassin subandin d'Équateur, révélé par la forte incision des formations décrites ici par les cours d'eau actuels [3, 23], montre que la surrection semble actuellement s'exagérer, en faisant passer le front subandin du domaine de dépôt à long terme au domaine d'incision dominante.

Réplacée dans le contexte de l'ensemble des bassins d'avant-pays des Andes centrales, l'évolution enregistrée par les dépôts néogènes du bassin équatorien diffère fondamentalement de celle des bassins subandins de Bolivie, du Pérou et de Colombie. En effet, les dépôts néogènes de Bolivie, du Pérou et de Colombie sont répartis en plusieurs dépocentres, formés successivement au cours de la propagation vers l'est de chevauchements et ont été progressivement intégrés au prisme orogénique [3, 8, 11, 13, 16]. L'étude sédimentologique ci-dessus montre qu'en Équateur, au contraire, la sédimentation s'est produite dans un unique dépocentre, qui s'est formé dès la fin de l'Oligocène [7], avec un raccourcissement considérablement plus faible et une vitesse de subsidence modérée pour un bassin suralimenté. L'évolution d'un drainage longitudinal vers un drainage transversal accompagnant l'augmentation de pente et la progradation vers l'est du cône alluvial traduit ici l'expansion du cône et la surrection de l'orogène, sans migration notable vers l'avant du front orogénique et sans augmentation importante du raccourcissement tectonique sur la marge interne du bassin comme communément admis [16, 20, 27]. Une autre origine, comme un allègement par érosion (*erosional unloading*) [6] ou un mécanisme profond, en relation avec la situation particulière de l'Équateur, doit être recherchée (travaux en cours).

Remerciements. Ces travaux ont été menés dans le cadre de la convention de coopération IRD–Petroproducción et du projet INSUn^o 99 PNSE 59. Nous remercions aussi J. Delgado et W. Winkler pour leur revue constructive.

Références

[1] P. Baby, M. Rivadeneira, F. Christophoul, R. Barragán, Style and timing of deformation in the Oriente of Ecuador, in: 4th Int. Symp. Andean Geodynamics, Göttingen, 1999, pp. 68–72.

[2] P. Baby, J.-L. Guyot, Y. Deniaud, D. Zubiate, F. Christophoul, M. Rivadeneira, F. Jara, The High Amazonian Basin: tectonic control and mass balance, in: Manaus'99 – Hydrological and Geochemical Processes in Large Scale River Basins, Manaus, Brésil, 1999.

[3] P. Baby, M. Souris, Mapa Geológico de la Cuenca Oriente, IRD–Petroproducción, Quito, Équateur, 2001.

- [4] J. W. Baldo, Geología del Ecuador. Boletín de Explicación del Mapa Geológico del Ecuador al 1:1 000 000, 66, Dirección General de Geología y Minería, Quito, Ecuador, 1982.
- [5] C. Beaumont, Foreland basin, *R. Astron. Geophys. J.* 137 (1981) 291–329.
- [6] D.W. Burbank, Causes of the recent Himalayan uplift deduced from deposited patterns in the Ganges basin, *Nature* 357 (1996) 680–682.
- [7] F. Christophoul, P. Baby, C. Davila, Stratigraphic responses to a major tectonic event in a Foreland Basin: the Ecuadorian Oriente Basin from Eocene to Oligocene times, *Tectonophysics* 345 (2001) 281–298.
- [8] M. A. Cooper, et al., Basin development and tectonic history of the Llanos basin, Eastern Cordillera and Middle Magdalena Valley, Colombia, *AAPG Bull.* 79 (1995) 1421–1443.
- [9] P. DeCelles, K.A. Giles, Foreland basin systems, *Basin Res.* 8 (1996) 105–123.
- [10] J. Delfaud, R. Sabrier, A. Lavenu, R. Marocco, Reconstitution des étapes de la surrection des Andes d'Équateur à partir de l'interprétation des minéraux argileux contenus dans les bassins intermontagnés (Miocène à Actuel), *Bull. Soc. géol. France* 170 (1) (1999) 13–24.
- [11] W. Gil Rodriguez, P. Baby, J.-F. Ballard, Structure et rôle paléogéographique de la zone subandine péruvienne, *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIa* 333 (11) (2001) 741–748.
- [12] P. L. Heller, C. L. Angevine, N. S. Winkler, C. Paola, Two-phase stratigraphic response model of foreland-basin sequences, *Geology* 16 (1992) 513–530.
- [13] W. Hermoza, Transferts sédimentaires Miocène-Pliocène et évolution géodynamique dans les bassins Hualaga et Marañón (Pérou, haut bassin de l'Amazone), *DEA Sciences de la Terre et Environnement, université Toulouse-3*, 2001, 45 p.
- [14] P. Homewood, P. A. Allen, G.D. Williams, Dynamics of the Molasse basin of western Switzerland, in: P.A. Allen, P. Homewood (Eds.), *Foreland Basins, Int. Assoc. Sedimentol. Spec. Publ.* 8 (1986) 199–217.
- [15] B. K. Horton, Erosional control on the geometry and kinematics of thrust belt development in the central Andes, *Tectonics* 18 (1999) 1292–1304.
- [16] B. K. Horton, P. G. DeCelles, Modern and ancient fluvial megafans in the foreland basin system of the Central Andes, Southern Bolivia: implications for drainage network evolution of fold-thrust belts, *Basin Res.* 13 (2000) 43–63.
- [17] C. Hoorn, Fluvial paleoenvironments in the intracratonic Amazonas Basin (Early Miocene–Early Middle Miocene, Colombia), *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 109 (1994) 1–54.
- [18] J. Hoorn, C. Guerrero, G. A. Sarmiento, M. A. Lorente, Andean Tectonics as a cause for changing drainage patterns in Miocene Northern South America, *Geology* 23 (3) (1996) 237–240.
- [19] D. Hungerbühler, M. Steinhilber, W. Winkler, D. Seward, A. Egüez, D. E. Peterson, U. Helg, C. Hammer, Neogene stratigraphy and Andean geodynamics of southern Ecuador, *Earth Sci. Rev.* 57 (2002) 75–124.
- [20] T. E. Jordan, Retroarc foreland and related basins, in: C. J. Busby, R. V. Ingersoll (Eds.), *Tectonics of Sedimentary Basins*, Blackwell Science, 1995, pp. 331–362.
- [21] K. Liu, P. A. Colivaux, Forest changes in the Amazon Basin during the last glacial maximum, *Nature* 318 (1985) 556–557.
- [22] A. D. Miall, The Geology of Fluvial Deposits: Sedimentary Facies, Basin Analysis and Petroleum Geology, Springer, 1996, 582 p.
- [23] M. Räsänen, R. Neller, J. Salo, H. Jungner, Recent and ancient fluvial depositional systems in the Amazon foreland basin, Peru, *Geol. Mag.* 129 (1992) 293–306.
- [24] M. R. Rosero, Análisis tectono-sedimentaria e interpretación geodinámica de las secuencias Oligocenas y Neógenas de la Cuenca Oriente Ecuatoriana, *thèse, Université Central del Ecuador*, Quito, Ecuador, 1999, 103 p.
- [25] F. Schlunegger, R. L. Slingerland, A. Matter, Crustal thickening and crustal extension as controls on the evolution of the drainage network of the central Swiss Alps between 30 Ma and the present: constraints from the stratigraphy of the North Alpine Foreland Basin and the tectonic evolution of the Alps, *Basin Res.* 10 (1997) 197–212.
- [26] H.D. Sinclair, P.A. Allen, Vertical versus horizontal motions in the Alpine orogenic wedge: stratigraphic response in the foreland basin, *Basin Res.* 4 (1992) 215–232.
- [27] H. D. Sinclair, Tectonic stratigraphic model for underfilled peripheral foreland basins: an Alpine perspective, *Geol. Soc. Am. Bull.* 109 (3) (1997) 324–346.
- [28] R. Spikings, D. Seward, W. Winkler, G. Ruiz, Low-temperature thermochronology of the northern Cordillera Real, Ecuador: tectonic insights for zircon and apatite fission track analysis, *Tectonics* 19 (4) (2000) 649–668.
- [29] H. J. Tschopp, Oil explorations in the Oriente of Ecuador, *AAPG Bull.* 37 (1953) 2303–2347.