

LES BASSES TERRASSES FLUVIATILES DU QUATERNAIRE RÉCENT DES ANDES BOLIVIENNES

DATATIONS PAR LE ¹⁴C
INTERPRÉTATION PALÉOCLIMATIQUE (1)

Michel SERVANT (2), Jean-Charles FONTES (3)

(2) Géologue O.R.S.T.O.M., 70-74, route d'Aulnay, 93140 Bondy, France

(3) Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie Isotopique, Université Paris-Sud, 91405 Orsay, France

RÉSUMÉ

Quatre étapes majeures sont individualisées dans l'évolution des vallées fluviales des Andes boliviennes, vers 4 000-4 500 m d'altitude, depuis le dernier maximum glaciaire : (A) 700 à 0 ans B.P. : érosion très active dans les fonds de vallée et sur les versants sous l'effet des pluies estivales et orageuses dans des conditions de température proches de l'actuel ; (B) 6 000 à 7 000 ans B.P. : réduction de l'érosion et accumulation de dépôts fins, localement tourbeux, dans les moyennes et petites vallées sous climat probablement sec ou aride, plus froid qu'actuellement, les précipitations hivernales à neiges étant dominantes ; (C) vers 7 000 ans B.P. : reprise de l'érosion avec récurrence d'un climat proche de l'actuel ; (D) entre 13 000 et 7 500 ans B.P. environ : sédimentation fluviale relativement fine liée à la présence d'un tapis neigeux, avec abaissement de température sous climat probablement sec et aride ; (E) entre 17 000 et 13 000 ans B.P. environ : érosion très active engendrée à nouveau par des pluies saisonnières et orageuses, avec des températures proches de leurs valeurs actuelles.

MOTS-CLÉS : Andes — Bolivie — Pléistocène — Holocène — Terrasses fluviales — Paléoclimatologie.

RESUMEN

LAS BAJAS TERRAZAS DE RIO DEL CUATERNARIO RECIENTE EN LOS ANDES BOLIVIANOS. DATACIONES POR EL MÉTODO ¹⁴C. INTERPRETACIÓN PALEOCLIMÁTICA

En los Andes bolivianos, mas o menos a 4 000-4 500 m s.n.m. la evolución de los pequeños valles, desde el máximo de la última glaciación, incluye cuatro etapas mayores : (A) 700-0 años B.P. : erosión fuerte en los fondos de los valles y las vertientes, en relación con lluvias de verano y temperaturas similares a sus valores actuales (B) 6 000-7 000 años B.P. : erosión débil, acumulación de depósitos finos con turbas, bajo condiciones climáticas mas frías, secas o áridas, con nevadas de invierno ; (C) 7 000 años B.P. aproximadamente : reactivación de la erosión en un clima semejante a lo que se observa actualmente ; (D) 13 000-7 000 años B.P. : sedimentación de depósitos mas o menos finos en los valles, en relación con nevadas, descenso de temperatura y clima seco o arido ; (E) 17 000-13 000 años B.P. aproximadamente : erosión muy fuerte en un clima con lluvias estacionales y temperaturas no mucho mas bajas que las temperaturas actuales.

PALABRAS CLAVES : Andes — Bolivia — Pleistoceno — Holoceno — Terrazas de rio — Paleoclimatología.

(1) Ce travail a été réalisé dans le cadre des accords de coopération entre l'Université Majeure de San Andres (UMSA) et l'O.R.S.T.O.M.

ABSTRACT

THE LATE QUATERNARY LOW FLUVIAL TERRACES IN THE BOLIVIAN ANDES. ^{14}C DATING. PALEOCLIMATIC INTERPRETATION

Four main phases have been observed in the evolution of the small rivers valleys in the Bolivian Andes (altitude: 4 000-4 500 m) since the last glacial maximum: (A) 700 to 0 ^{14}C y. B.P.: intense erosion in the valley floors and on the slopes due to summer and stormy rainfalls in conditions of temperature similar to the current ones; (B) 6 000-700 y. B.P.: decrease in erosion, accumulation of fine and locally peaty deposits under dry or arid climate colder than today with winter snow; (C) at about 7 000 y. B.P.: erosion with climate similar to the current one; (D) 13 000-7 500 y. B.P.: rather fine sedimentation related to a snow cover with a decrease in temperature under dry and arid climate; (E) 17 000-13 000 y. B.P.: intense erosion caused by seasonal and stormy rainfalls, temperatures not much lower than the current ones.

KEY-WORDS : Andes — Bolivia — Pleistocene — Holocene — Fluvial terraces — Paleoclimatology.

INTRODUCTION

Une publication antérieure (SERVANT *et al.*, 1981) a montré que la morphogenèse des Andes de Bolivie a évolué au Quaternaire récent entre deux situations extrêmes caractérisées, la première par un ravinement des versants et le creusement des rivières, la seconde par une érosion fortement diminuée, une extension des tourbières et des marécages et une sédimentation fluviale relativement fine dans les fonds des petites vallées. Cette évolution est très apparente dans une tranche d'altitude comprise entre 3 700 et 4 500 m environ. Nous en précisons ici les principales étapes en nous appuyant sur l'analyse détaillée des basses terrasses et sur la datation par le ^{14}C de 48 échantillons. Notre étude portera sur le piedmont ouest de la Cordillère Orientale à l'Ouest de la ville de La Paz et sur des vallées affluentes du rio Mauri, dans la Cordillère Occidentale (fig. 1).

SITES DE RÉFÉRENCE

Contexte géomorphologique et hydrologique

La figure 2 représente, de manière très schématique, une partie du piedmont de la Cordillère Orientale au Nord-Est de la ville de La Paz. Elle permet de définir, sur un exemple régional, les différents axes de drainage de la partie haute des Andes :

(1) Les plus grandes vallées sont celles qui drainent les chaînes montagneuses. Elles sont caractérisées en amont par une morphologie glaciaire, les dépôts du Quaternaire récent y étant principalement représentés par des moraines et des sédiments lacustres ou marécageux retenus en arrière de ces moraines. Vers l'aval, on rencontre surtout des terrasses ou des cônes de déjection à éléments grossiers et mal classés.

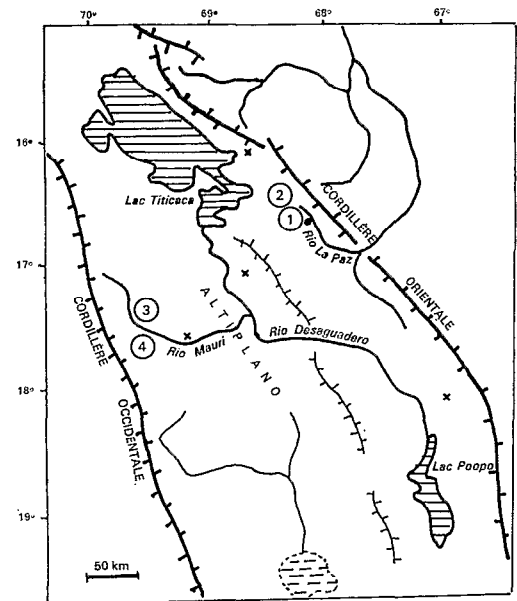


FIG. 1. — Localisation des principaux sites étudiés. 1 : Haute vallée de La Paz : rio Kaluyo, rio Chuquiaguillo ; 2 : rio et quebradas Sorechata, rio Chiarjahuira ; 3 : quebradas Kalachaca ; 4 : rio Jaketa. Les sites signalés par une croix ne sont pas décrits dans le texte mais leur étude participe aux interprétations stratigraphiques et paléohydrologiques

(2) Les vallées mineures, dont un exemple est donné par le rio Sorechata, présentent un bassin versant complètement isolé de la partie haute des chaînes montagneuses. Ces vallées n'ont pas été occupées par les glaciers du Quaternaire récent. Les dépôts du Pléistocène supérieur et de l'Holocène y sont très érodés et subsistent sous forme de quelques témoins de basses terrasses étagées convergentes vers l'aval. Dans ce type de vallée, les eaux de fonte des glaciers n'ont pas participé directement à l'alimentation des écoulements.

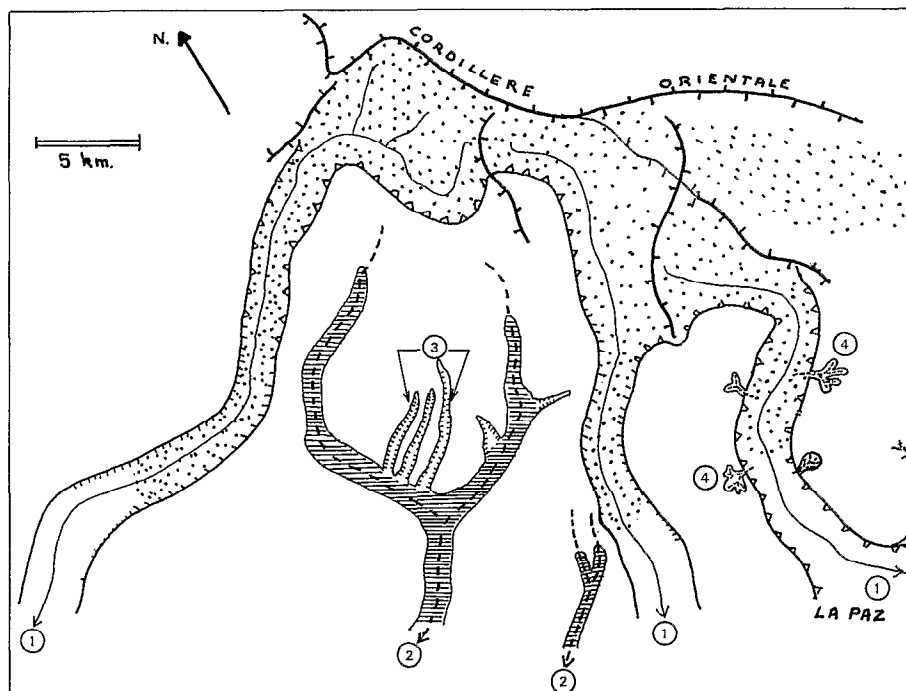


FIG. 2. — Schéma d'une partie du piedmont ouest de la Cordillère Orientale au Nord-Ouest de la ville de La Paz. 1 : Vallées majeures (d'Ouest en Est : rio Tuni, rio Milluni, rio Kaluyo) ; 2 : Vallées mineures (Sorechata à l'Ouest, Chiarjahaira à l'Est) ; 3 : quebradas ; 4 : ravinements sur versants

(3) Les petits axes de drainage (appelés *quebradas* dans la terminologie locale) correspondent le plus souvent à de profondes incisions, antérieures au Quaternaire récent, sur le piedmont des chaînes montagneuses. Un exemple en est donné par les *quebradas* de Sorechata. Ces incisions, dont le profil longitudinal n'a pas plus de quelques kilomètres, sont encaissées de plusieurs dizaines de mètres. Les écoulements y sont exclusivement alimentés par des précipitations locales ou, localement, par des sources. Le Quaternaire récent est représenté, dans ce type d'axe de drainage, par des dépôts épais, parfois bien conservés.

(4) On rencontre enfin, sur les versants, des ravinements profonds, postérieurs au dernier pléni-glaciaire, ayant alimenté des cônes de déjection situés sur les bordures des vallées. La mise en place de ces cônes fut contrôlée à la fois par le ruissellement local sur les pentes et les écoulements longitudinaux des axes majeurs.

La vallée de La Paz (Cordillère Orientale)

Le rio La Paz résulte de la confluence de deux axes hydrographiques majeurs (rios Kaluyo et Chuquiaguillo). Trois étapes principales sont iden-

tifiées dans l'évolution de ces vallées (SERVANT *et al.*, 1981) :

(1) Une phase de ravinement des versants a alimenté de puissants cônes de déjection que l'on rencontre en amont et en aval des moraines du dernier pléni-glaciaire ; les cônes passent latéralement à une terrasse de dépôts grossiers et mal classés, localement argileux, ce qui suggère une mise en place par écoulements boueux (*Terrasse Miraflores*). Ces dépôts atteignent 30 à 40 m d'épaisseur dans l'axe principal de la vallée de La Paz mais sont beaucoup moins épais dans les vallées affluentes (Achumani, par exemple). Ici, la *terrasse Miraflores* est en fait un glacis-terrasse dont quelques témoins au Sud-Est de la ville de La Paz, sur la route à Palca, sont dépourvus de couverture détritique.

(2) Une phase de creusement est observée sur l'ensemble des profils longitudinaux. Un épisode intermédiaire de remblaiement grossier est localement attesté par une terrasse peu étendue, à +10 m, près de la place Villarroel, à La Paz.

(3) Une phase d'accumulation succède au creusement précédent.

Dans le rio Chuquiaguillo, elle est représentée sur la rive droite, au pied d'un versant, par un témoin

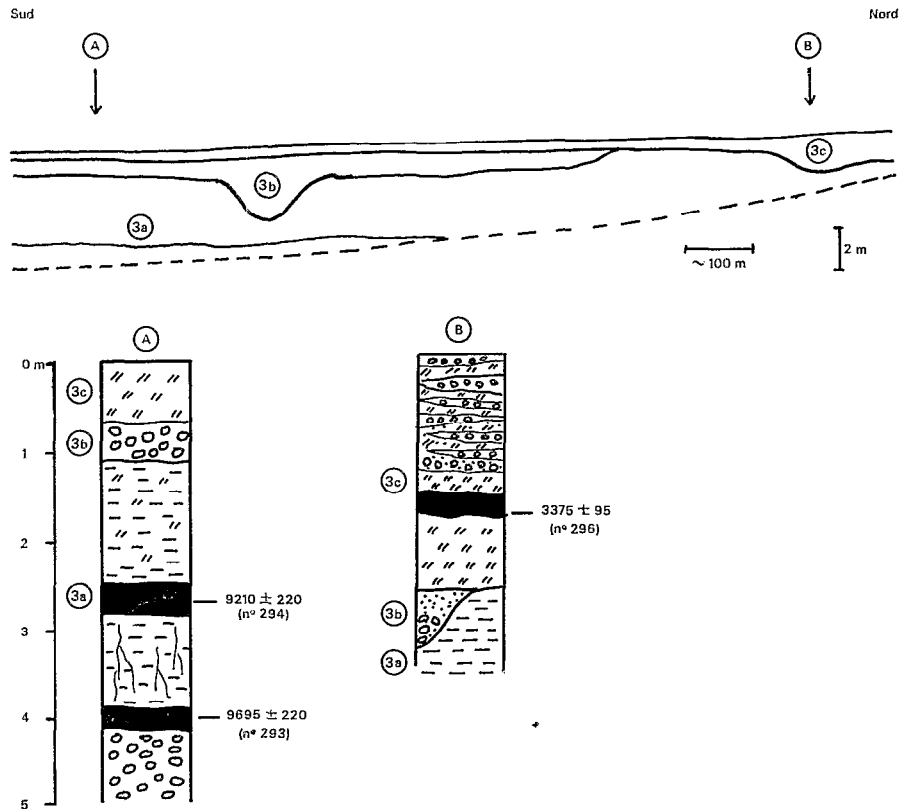


FIG. 3. — Basse terrasse du rio Kaluyo (Cordillère Orientale). En haut : coupe longitudinale du site de Patapatani. En bas : successions lithologiques. Légende dans le texte. Légende des figures lithologiques : voir fig. 5

de dépôts grossiers à limons et tourbes intercalées, où l'on peut distinguer schématiquement de bas en haut (YBERT, 1984) :

— 4 à 5 m : Limons sableux et tourbes à couches caillouteuses intercalées. Cette formation est datée de $12\,700 \pm 230$ ans B.P. dans la partie inférieure et de $8\,330 \pm 170$ ans B.P. vers le sommet.

— 4 m environ : Cailloux et de cailloutis (matrice souvent limoneuse ou argileuse) à nombreux niveaux plus ou moins discontinus de tourbes. La base est datée de $4\,280 \pm 560$ ans B.P., le sommet de 765 ± 85 ans B.P.

— 2 à 4 m : Cailloux mal classés d'un cône de déjection lié au ravinement du versant (*bad-lands* aujourd'hui encore actifs). Ce cône est recoupé par le creusement, récent et actuel, de la vallée.

Dans le rio Kaluyo et immédiatement en arrière des moraines du dernier maximum glaciaire, nous observons du plus ancien au plus récent (fig. 3) :

— 4 à 5 m de dépôts bien stratifiés, limoneux, argileux ou tourbeux qui tapissent le fond de la vallée. Deux datations au ^{14}C situent la partie inférieure entre $10\,000$ et $9\,000$ ans B.P. environ. L'extrême base, antérieure à $9\,685 \pm 220$ ans B.P., paraît essentiellement caillouteuse mais n'affleure que de manière ponctuelle et sur quelques décimètres d'épaisseur.

— Une surface de ravinement. L'érosion a pu être au moins localement interrompue par une phase de colmatage des chenaux.

— 1 à 2,50 m de limons, sables, graviers et cailloutis en lentilles métriques ou centimétriques interdigitées. Les détritiques sont issus du remaniement par ruissellement des versants et forment des cônes de déjection plats. Des tourbes et des limons sont localement intercalés à la base des dépôts dans la partie externe des cônes. L'une de ces tourbes est datée de $3\,375 \pm 95$ ans B.P.

Ces deux coupes révèlent du plus ancien au plus récent la succession suivante :

(3 a) Une phase d'accumulation ($12\,700$ - $8\,300$ ans B.P. environ) de tourbes et de limons dominants ; des détritiques grossiers s'intercalent dans ces dépôts au pied des versants (Chuquiaguillo).

(3 b) Une phase de creusement et/ou de sédimentation grossière bien identifiée dans le rio Kaluyo.

(3 c) Une phase d'accumulation marquée par des cônes de déjection où les détritiques fins (graviers et limons) sont dominants ; des tourbes peuvent s'interstratifier dans ces dépôts. Cette période se situe approximativement entre $4\,280$ et 765 ans B.P.

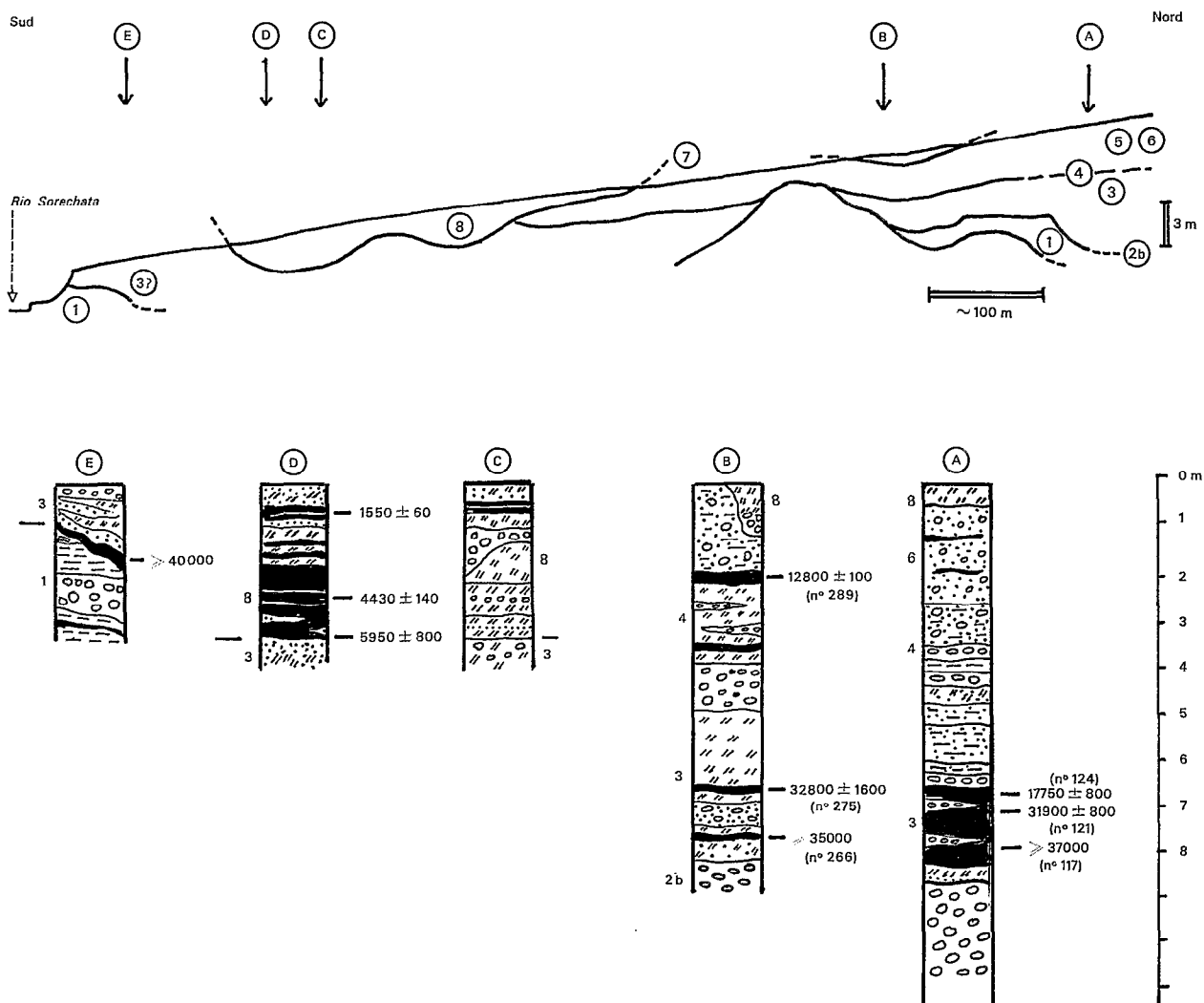


FIG. 4. — Remblaiement d'une quebrada de Sorechata (Cordillère Orientale). En haut : coupe longitudinale (légende dans le texte). En bas : exemples de successions lithologiques verticales. Légendes des figures lithologiques : voir fig. 5

(3 d) Une phase d'érosion caractérisée par un ravinement actif des versants, et par la mise en place locale de cônes de déjection très grossiers. Ces cônes atteignent une grande extension dans les zones où affleurent des formations conglomératiques tertiaires.

La vallée du rio Sorechata (Cordillère Orientale)

Cette vallée est isolée de la chaîne montagneuse ; seuls quelques glaciers de cirque ont existé, pendant la dernière glaciation, dans la partie haute du bassin de drainage. L'axe principal de la vallée comporte de rares témoins de deux terrasses conglomératiques (Sorechata I et II) respectivement situées à 8 m

et 5 m au-dessus de la rivière actuelle. Quelques niveaux tourbeux, peu épais et discontinus, ont permis de dater le premier remblaiement de plus de 35 000 ans B.P. à la base (Sorechata I), et le deuxième remblaiement de 17 000 ans B.P. environ dans la partie moyenne (Sorechata II) (ARGOLLO, 1982). Une très basse terrasse limoneuse (+1 m) est présente en témoins isolés et de faible extension.

Quelques incisions entaillent, sur le flanc nord de la vallée, des formations glaciaires ou fluvio-glaciaires du Quaternaire ancien et moyen. Ces incisions sont étroites (100-200 m) et profondes (20-30 m). Leurs profils longitudinaux fortement inclinés (20 %) n'ont pas plus de 1 à 2 km de longueur. De nombreux témoins de dépôts du Quaternaire

récent y sont conservés sur une quinzaine de mètres d'épaisseur maximale. Plusieurs surfaces internes de ravinement y sont nettement apparentes et marquent une reprise épisodique du creusement. Nous y distinguons du plus ancien au plus récent (fig. 4) :

(1) Dépôts caillouteux mal classés localement argileux (4 m). Des couches de tourbes y sont intercalées. L'une d'elle, située au sommet, affiche plus de 35 000 ans B.P. Cette formation subsiste en témoins isolés dans la partie haute du profil longitudinal. Vers l'aval, au débouché dans la vallée du rio Sorechata, un cône de déjection semble pouvoir lui être rattaché ; il est constitué de cailloux et de cailloutis où s'intercalent des passées limoneuses et des tourbes lenticulaires. Celles-ci accusent plus de 40 000 ans B.P.

(2) Surface d'érosion (2a) localement surmontée par des gravats mal classés de 2 m d'épaisseur au maximum (2b). Formation limoneuse et tourbeuse à cailloux mal classés interstratifiés (7 m environ). Cette formation affleure de manière discontinue et il est difficile d'établir des corrélations détaillées entre les différentes coupes. Il semble toutefois qu'on puisse y distinguer les niveaux 3, 4 et 5 suivants :

(3) A la base des tourbes à lentilles caillouteuses ou des limons à tourbes intercalées. Cinq datations au ^{14}C situent ces couches entre plus de 35 000 ans et $17\,750 \pm 800$ ans B.P. Nous ne pouvons pas exclure la présence de surfaces internes de ravinement.

(4) Dépôts caillouteux, peu épais (0,5 à 1 m) peut-être limités à la base par une surface de ravinement.

(5) Limons et sables fins, plus ou moins argileux, à lentilles décimétriques ou métriques de cailloux et cailloutis mal classés. Au sommet une tourbe est datée de $12\,800 \pm 100$ ans B.P. (éch. 289).

(6) Cailloux mal classés à matrice plus ou moins argileuse ou limoneuse. Ces dépôts discontinus sont issus du remaniement par solifluxion des formations glaciaires ou fluvio-glaciaires du Quaternaire ancien à moyen.

(7) Surface d'érosion.

(8) Limons comprenant des couches ou des lentilles de tourbes et localement des lentilles centimétriques à décimétriques de graviers et de cailloutis (épaisseur maximale : 4 m). Cette formation passe latéralement, vers l'amont et sur les versants, à un sol brun comprenant un horizon organique superficiel de 5 à 30 cm d'épaisseur. Dans le détail, nous y distinguons :

(8a) A la base, limons gris à lentilles caillouteuses ou tourbes à lentilles centimétriques de sables et de graviers. Ces couches sont datées de $5\,950 \pm 800$ ans B.P. dans la partie moyenne.

(8b) Surface interne de ravinement dont les chenaux sont colmatés par des sédiments grossiers. Le ravinement s'accroît vers l'aval.

(8c) Limons et sables fins gris à lentilles de graviers dans la partie supérieure ; une tourbe litée, située vers la base, est datée de $1\,550 \pm 60$ et $1\,560 \pm 80$ ans B.P. dans deux affleurements distants de quelques centaines de mètres.

(9) Surface d'érosion encore actuellement active. Le fond de la vallée est tapissée par des dépôts grossiers et des fragments remaniés de tourbes.

Cette succession fait apparaître quatre séquences majeures de dépôt, où les faciès limoneux et tourbeux sont prépondérants : la première (terme 1) est antérieure à 35 000 ans B.P. ; la deuxième (terme 3) débute avant 35 000 ans et s'achève vers 18 000 ans B.P., la troisième (terme 5) date de la fin du Pléistocène (13 000 ans B.P. environ) mais semble tronquée au sommet, la quatrième (terme 8) se situe entre 6 000 et un peu moins de 1 500 ans B.P. environ. Ces séquences se révèlent très complexes dans le détail : des lentilles de sédiments plus ou moins grossiers peuvent s'y intercaler, des surfaces mineures de ravinement y sont localement apparentes. Elles matérialisent cependant des phases d'accumulation de sédiments en moyennes relativement fins qui s'opposent nettement à des épisodes de creusement ou de sédimentation grossière (termes 2, 4?, 7 et 9).

La période comprise entre $12\,800 \pm 100$ et $5\,950 \pm 800$ ans B.P. est mal définie dans la *quebrada* de Sorechata. Toutefois, une petite vallée proche (Chiarjahura) offre de vastes témoins d'une séquence de dépôts limoneux et bien stratifiés datée $9\,820 \pm 120$ ans B.P. à la base. Le Pléistocène terminal n'y a pas été identifié.

Quebrada Kalachaca (Cordillère Occidentale)

Cette *quebrada*, affluente du rio Mauri, entaille, sur près de 100 m d'épaisseur des ignimbrites pliocènes (formation PEREZ). Elle est dominée par des escarpements rocheux dont la base est tapissée par des colluvions stratifiées. Le fond de cette petite vallée est colmaté par 10 à 15 m de dépôts de Quaternaire récent. Ceux-ci sont entaillés par une érosion régressive qui affecte la partie basse du profil longitudinal. De nombreuses autres vallées présentent la même morphologie et les mêmes dépôts au Nord du rio Mauri mais n'ont pas été étudiées de manière détaillée.

Le remblaiement de la *quebrada Kalachaca* comprend du plus ancien au plus récent les termes suivants :

(1) Dépôts très grossiers à blocs d'ignimbrite, surmontés par 2 à 3 m de cailloux à couches intercalées de tourbes et d'argiles.

(2) Surface d'érosion.

(3) Dépôts essentiellement constitués de graviers stratifiés à éléments anguleux, épais de 4 à 5 m. Des tourbes lenticulaires peu nombreuses y sont intercalées à plusieurs niveaux. L'une d'elle, située près du sommet de la formation, est datée de $10\,060 \pm 135$ ans B.P. Une autre tourbe, prélevée dans une vallée proche, affiche un âge de $13\,230 \pm 80$ ans B.P. Ces dépôts passent, au pied des versants, à des colluvions issues de la fragmentation par le gel des roches volcaniques. Dans le fond de la vallée, ils sont bien stratifiés et souvent caractérisés par des séquences centimétriques à décimétriques, grano-classés, comprenant des graviers à la base, de limons au sommet

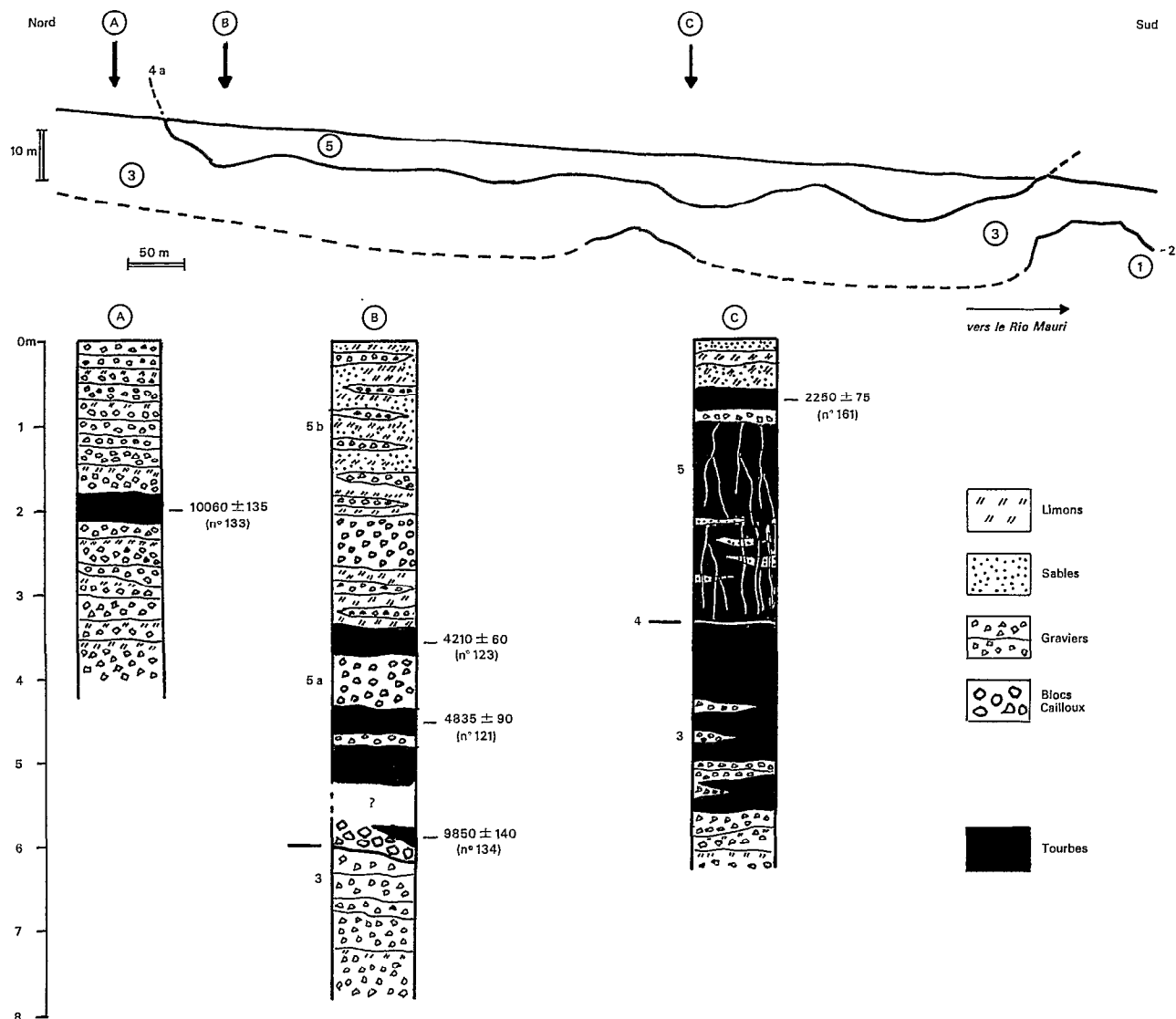


FIG. 5. — Remblaiement de la *quebrada* Kalachaca (Cordillère Occidentale). En haut : coupe longitudinale. En bas : exemples de successions lithologiques verticales. Légende dans le texte

eux-mêmes surmontés par un lit millimétrique de débris végétaux.

(4) Surface d'érosion (4a) localement surmontée par une couche de blocs et de cailloux (4b). Une tourbe, peut-être remaniée, repose sur ces dépôts grossiers : elle date de $9\ 850 \pm 140$ ans B.P.

(5) Formation limoneuse à lentilles de graviers et tourbes intercalées (3 à 4 m). En amont, cette formation comprend :

(5a) A la base, des tourbes litées à lentilles décimétriques ou métriques de graviers et cailloutis. Ces couches sont datées de $4\ 835 \pm 90$ ans B.P. dans la partie moyenne et de $4\ 210 \pm 60$ ans B.P. au sommet.

(5b) Limons gris, graviers et cailloutis en lentilles plates imbriquées.

En aval, nous retrouvons des tourbes à la base (5a?) ; la partie supérieure est ici caractérisée par des couches organiques à lentilles graveleuses, dont un échantillon, prélevé au tiers supérieur, affiche un âge ^{14}C de $2\ 250 \pm 75$ ans B.P.

Ces successions révèlent le passage, de bas en haut, d'une sédimentation essentiellement organique à une sédimentation limoneuse à graveleuse, les tourbes n'ayant plus au sommet qu'une extension réduite.

(6) Surface d'érosion.

Le site de Kalachaca permet d'individualiser deux séquences majeures de dépôts séparées par une surface de creusement (4). La première séquence (3) est essentiellement graveleuse mais comprend au

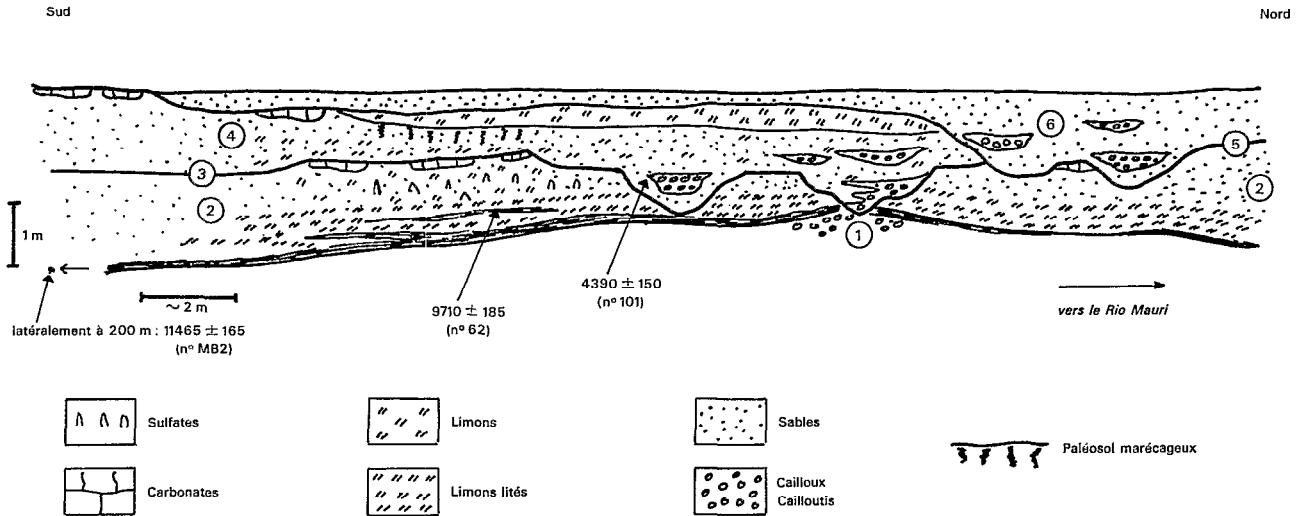


FIG. 6. — Basse terrasse du rio Jaketa. Coupe longitudinale d'un affleurement situé près de la route Charana-Abarroa. Légende dans le texte

moins une lentille de tourbes épaisses et une autre couche organique plus continue intercalée. Elle date d'un peu plus de 13 280 ans B.P. à la base et d'un peu moins de 10 000 ans B.P. environ au sommet. La deuxième séquence (5), riche en tourbe dans sa partie inférieure se situe de l'Holocène moyen à récent (d'un peu plus de 4 210 ans à moins de 2 250 ans B.P. environ).

Des séquences plus anciennes sont identifiées mais ne sont pas datées pour le moment (1).

Rio Jaketa (Cordillère Occidentale)

Quelques témoins d'une basse terrasse ont été observés en amont de la confluence avec le rio Mauri sur la route de Charaña à Abarroa. Nous y observons du plus ancien au plus récent :

(1) Des dépôts caillouteux affleurant de manière ponctuelle à la base des affleurements.

(2) Une formation limoneuse (2 à 3 m) à couches rubannées intercalées (alternance de lits noirs et de lits clairs). La partie inférieure comprend des lentilles métriques de limons et de couches organiques interdigitées. Dans la partie supérieure, la stratigraphie est perturbée par des accumulations discontinues d'évaporites (gypse) dont la mise en place paraît liée à la remontée capillaire d'une ancienne nappe phréatique. Le sommet de la formation est souligné par une induration calcaire discontinue. Une tourbe riche en soufre, prélevée dans la partie inférieure, est datée de $11\,465 \pm 165$ ans B.P. Une autre couche organique de la partie inférieure affiche un âge de $9\,710 \pm 185$ ans B.P.

(3) Surface de ravinement marquée par des chenaux qui recoupent la presque totalité du terme 2.

(4) Dépôts sablo-limoneux à lentilles métriques de cailloux et de cailloutis (1 à 2 m) surmontés par une couche de limons blancs calcaires. Un horizon palustre est localement observé sous cette couche limoneuse. Quelques nodules calcaires plats apparaissent au sommet. Des débris ligneux, prélevés à la base du remplissage d'un chenal, sont datés de $4\,390 \pm 150$ ans B.P.

(5) Surface de ravinement.

(6) Sables limoneux à lentilles métriques de dépôts grossiers mal classés.

(7) Surface de creusement, actuellement fonctionnelle.

CORRÉLATIONS STRATIGRAPHIQUES, PHASES MAJEURES DE LA MORPHOGENÈSE FLUVIATILE

La figure 7 résume les corrélations que nous proposons entre les coupes précédentes avec l'appui des datations au ^{14}C . Les axes mineurs de drainage ont évolué, dans les sites étudiés, par alternance entre des périodes d'érosion et des périodes de sédimentation limoneuse à graveleuse, plus ou moins organique. Les séquences à dépôts fins sont approximativement synchrones. Six phases majeures de dépôt ou d'érosion sont individualisées dans ces axes mineurs de la Cordillère Orientale et de la Cordillère Occidentale. Nous les désignerons, de la plus récente à la plus ancienne par les lettres A à F.

La phase A est caractérisée par une érosion généralisée des versants et des fonds de vallées et par la mise en place au pied des pentes ou dans certaines parties des profils longitudinaux de sédiments grossiers et mal classés (transport de fond et

CORDILLERE OCCIDENTALE

CORDILLERE ORIENTALE

PHASES MAJEURES

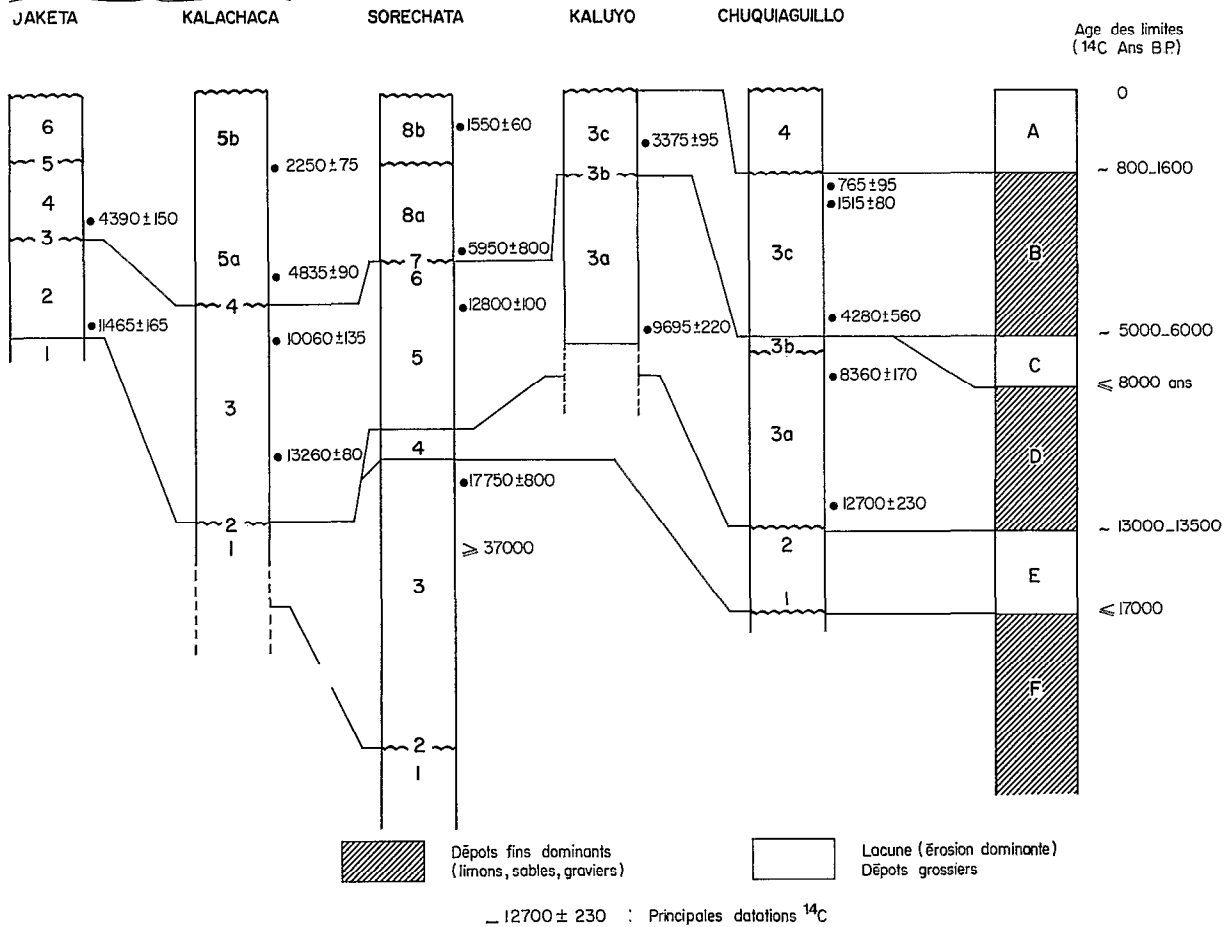


FIG. 7. — Corrélations stratigraphiques. Les phases majeures de la morphogénèse et de la sédimentation fluviale au Quaternaire récent.

cônes de déjection). La morphogénèse est de toute évidence liée ici à des précipitations orageuses et à des écoulements de crue. Cette phase débute après 1 500 ou 800 ans B.P. environ (Sorechata), le ravinement des versants ayant été particulièrement actif après 765 ans B.P. environ (Chuquiaguillo). Le creusement du fond des petites vallées s'est effectué de manière régressive à partir des axes majeurs du drainage. Très apparent dans la partie basse des profils longitudinaux, il est souvent peu marqué en amont (Kalachaca). Les reprises d'érosion, caractéristiques de la phase A, peuvent donc être décalées dans le temps en fonction de l'altitude.

La phase B correspond à un colmatage des fonds des petites vallées par des sédiments où les faciès grossiers sont rares ou absents. Elle indique une érosion atténuée des versants et l'absence d'écou-

lements assez puissants pour évacuer les détritiques vers l'aval. Cette phase de remblaiement est datée de 6 000 à 5 000 ans B.P. dans sa partie inférieure et de moins de 1 500 ans B.P. environ dans sa partie supérieure. Nous l'avons identifiée dans tous les sites étudiés, sauf à Chiarjahuirra.

Les dépôts présentent de rapides variations lithologiques. Deux types de faciès peuvent y être définis. Le premier comprend des limons gris, souvent riches en tourbes, bien stratifiés : il évoque des écoulements superficiels à faible débit à transport en suspension dans des fonds de vallée plus ou moins colonisés par une végétation humide. Le second est caractérisé par des lentilles plates, imbriquées, centimétriques ou métriques, des graviers, sables ou limons, exceptionnellement caillouteuses. Il évoque des écoulements diffus, une réduction du tapis végétal dans les fonds de vallée et un ruissellement

sur les versants permettant des apports en détritiques fins à moyens (graviers). Ces apports, par les versants, sont localement confirmés par la présence de petits cônes de déjection sur les bordures des vallées (Kaluyo). Les faciès détritiques tendent à prédominer dans la partie supérieure de la phase B (Kalachaca, Sorechata, Kaluyo).

La mise en place de ces dépôts a été épisodiquement interrompue par de petites phases de ravinement. Celles-ci sont en général peu apparentes. Nous en avons observé un exemple à Sorechata (terme 8b), après 4 430 ans B.P. et avant 1 560 ans B.P. environ. Un autre exemple est donné par la coupe de Jaketa (terme 3). Signalons aussi qu'un ravinement holocène récent des versants peut être individualisé dans la Cordillère Orientale, notamment dans la vallée d'Ichu-Khota. Ce ravinement a alimenté ici des cônes de déjection surmontés par une tourbe datée de $3\,120 \pm 150$ ans B.P. (SERVANT-V., 1982). Cela suggère qu'une reprise de courte durée des écoulements de crue, favorables au ravinement, pourrait avoir lieu après 4 430 ans B.P. (Sorechata) et avant 3 120 ans B.P. environ (Ichu-Khota).

La phase C est représentée, dans toutes les coupes observées, par une surface de creusement qui recoupe les dépôts plus anciens et notamment ceux du Pléistocène supérieur et de l'Holocène ancien. Le creusement est antérieur à 6 000 ou 5 000 ans B.P. Des observations antérieures (SERVANT et FONTES, 1978), suggèrent que ce creusement pourrait être postérieur à 7 500 ans B.P. sur une basse terrasse d'une vallée de l'Altiplano (coupe Ballivián). Sa durée serait donc limitée à un ou deux millénaires.

La phase D est marquée par une accumulation de dépôts fluviatiles relativement fins datés d'un peu plus de $13\,230 \pm 80$ ans B.P. (Kalachaca) à moins de 10 000 ans B.P. (Jaketa, Chiarjahuirra, etc.). Ces dépôts n'ont pas été observés sur toute leur épaisseur : dans certaines coupes, les formations du Pléistocène terminal situées à la base des affleurements sont peu apparentes (Jaketa, Chiarjahuirra, Kaluyo) ; dans d'autres, l'Holocène ancien est peu épais (Kalachaca) ou probablement érodé (Sorechata). Le passage entre le Pléistocène et l'Holocène est de ce fait mal connu mais ne semble pas être marqué par une modification majeure de la sédimentation fluviatile (Jaketa, Kaluyo).

Les dépôts de la phase D sont essentiellement limoneux dans les vallées qui entaillent des formations fluviatiles, glaciaires ou lacustres du Plio-Pléistocène. Ils sont graveleux dans la *quebrada* Kalachaca, creusée dans des ignimbrites, et, ici, directement issus des versants proches. Ils présentent un aspect anguleux paraissant indiquer qu'ils proviennent d'une fragmentation par le gel des

roches volcaniques. Dans tous ces dépôts, les tourbes sont rares, peu épaisses ou très localisées. Cela souligne que la végétation humide ne s'est pas très largement développée dans les fonds de vallée, exception faite d'une ou deux phases de courte durée. Globalement, les faciès du Pléistocène terminal et de l'Holocène ancien évoquent des écoulements diffus, et parfois de faibles crues épisodiques (dépôts stratifiés et granoclassés de Kalachaca).

La phase E correspond à une reprise de l'érosion. Dans la région de La Paz, le ravinement des pentes a alimenté des cônes de déjection antérieurs à 12 350 ans B.P. environ et postérieurs au dernier pléniglaciaire. Ce dernier est daté de moins de 25 000 ans B.P. au sud-est du Pérou (MERCER et PALACIOS, 1977) et de moins de $1\,661 \pm 130$ ans B.P. dans la Cordillère de Tunari, au nord-est de la ville de Cochabamba en Bolivie (SERVANT *et al.*, 1981 ; GOUZE, en préparation). Cette phase d'érosion se situe donc approximativement entre 16 600 et 12 300 ans B.P. mais pourrait être plus brève que cet intervalle de temps.

La phase F n'est bien connue et datée qu'à Sorechata. Aussi ne pouvons-nous pas lui attribuer une signification stratigraphique à l'échelle de l'ensemble des régions étudiées. A Sorechata, cette phase comprend deux séquences de dépôt à tourbes intercalées, la plus ancienne étant antérieure à 40 000 ans B.P., la seconde se situant au moins dans sa partie supérieure entre 32 000 et 17 000 ou 18 000 ans B.P. environ.

INTERPRÉTATIONS PALÉOCLIMATIQUES

Climat actuel et morphogenèse fluviale

Les précipitations actuelles diminuent, en valeurs moyennes annuelles, du Nord-Est (Cordillère Orientale) où elles atteignent 800 mm environ, au Sud-Ouest (Cordillère Occidentale) où elles sont inférieures à 200 mm. Elles ont lieu, pour plus de 80 %, entre novembre et mars, avec un maximum en janvier et février pendant l'été austral. Cette distribution saisonnière se traduit par des écoulements temporaires dans toutes les petites vallées que nous avons étudiées. Des chutes de neiges peuvent cependant avoir lieu en hiver mais demeurent exceptionnelles. Aux altitudes inférieures à 4 500 m, les précipitations d'été sont souvent des pluies orageuses qui favorisent le ruissellement et les écoulements de crues. Cela se traduit par un ravinement très actif des versants, une accumulation locale de sédiments grossiers et mal classés (cônes de déjection) et une érosion des fonds de vallée. En plus haute altitude, les neiges sont fréquentes mais leur fonte, en quelques heures, alimente, comme les pluies aux altitudes plus basses, des écoulements de crues. Ce ruissellement différé

est cependant moins actif, ce qui se traduit par des ravinements beaucoup moins accentués sur les versants. Les sorties d'eaux souterraines, ponctuelles ou diffuses, sont ici fréquentes : elles sont liées à une meilleure infiltration des eaux météoriques issues de la fonte des neiges.

Ces sorties d'eaux ont parfois un débit suffisant pour alimenter des écoulements en toutes saisons, y compris dans les régions actuellement semi-arides ou arides. Des zones en permanence humides s'individualisent dans les fonds de vallées et sont colonisées par une végétation aquatique dense. Les pentes longitudinales, souvent fortes, favorisent un ruissellement diffus dans le tapis végétal. Les écoulements peuvent cependant être freinés par le gel en hiver. Nous sommes en présence de milieux fluviatiles, bien drainés, où la végétation retient les particules fines. La sédimentation est donc essentiellement organique (tourbières), plus ou moins limoneuse ou sableuse, parfois graveleuse ou caillouteuse dans quelques chenaux. Ces milieux particuliers sont rares ou ponctuels aux altitudes inférieures à 4 400-4 500 m. On les rencontre plus souvent dans la partie haute des profils longitudinaux. La végétation aquatique qui les caractérise est très sensible aux modifications des apports en eau : elle se dessèche quand il y a un abaissement des nappes souterraines et tarissement des sources.

Application à l'interprétation paléoclimatique

Le ravinement des versants et le creusement des rivières sont, comme nous venons de le voir, les phénomènes prépondérants de la morphogenèse actuelle : ils caractérisent un climat à pluies saisonnières et orageuses. Or ce sont ces phénomènes qui ont joué un rôle déterminant dans le façonnement des paysages, au Quaternaire récent, lors des phases A, C et E respectivement datées de 0-1 500, 6 000-7 000 et 13 000-16 000 ans B.P. environ. Nous pouvons donc admettre que les précipitations étaient, à ces époques comme aujourd'hui, des pluies saisonnières et orageuses. Le fait qu'elles soient plus souvent des pluies que des neiges indique que les températures n'étaient pas de beaucoup inférieures à leurs valeurs actuelles, au moins aux altitudes des sites étudiés (4 000 m environ).

Dans ces mêmes sites, les dépôts du Pleistocène terminal, de l'Holocène ancien (phase D) et de l'Holocène moyen à récent (phase B) indiquent des conditions paléohydrologiques radicalement différentes : le ruissellement n'était pas assez actif pour raviner profondément les versants, les écoulements n'avaient pas la capacité d'évacuer les détritiques fins ou moyens vers l'aval. Cela démontre que le contexte climatique n'était pas favorable aux crues très marquées des rivières. Les pluies orageuses, caractéristiques du climat actuel, étaient absentes.

Des tourbes, plus ou moins épaisses, s'intercalent dans ces dépôts. Elles indiquent la présence, au Quaternaire, dans des vallées aujourd'hui asséchées pendant une grande partie de l'année, de secteurs en permanence humides, occupés par une végétation aquatique. Nous retrouvons ici les milieux fluviatiles à sédimentation organique que nous avons signalés dans certains paysages actuels. Ils révèlent des écoulements permanents, liés probablement à une élévation des nappes souterraines et à une meilleure alimentation des aquifères.

Les tourbes sont souvent lenticulaires et situées sur les bordures des anciennes vallées : elles signalent des sorties d'eau souterraine au pied des versants. Elles peuvent aussi se développer de manière plus continue à l'échelle des affleurements et paraissent, en ce cas, indiquer une large extension du tapis végétal dans les fonds de vallée. Ces couches organiques sont interstratifiées dans des dépôts limoneux, riches en phytolithes, ou dans des sédiments sableux ou graveleux. Les passées détritiques marquent vraisemblablement une dégradation de la végétation aquatique et une réduction des zones en permanence humides ; cela peut s'expliquer par un abaissement de la nappe phréatique. Les sables et les graviers correspondent à de petits cônes de déjection (Holocène récent de Kaluyo), ou à des épandages stratifiés qui se raccordent aux colluvions de la base des versants (Pléistocène terminal de Kalachaca). Ces cônes et ces épandages signalent un ruissellement modéré sur les pentes, sans ravinement. Les détritiques anguleux pourraient provenir d'une fragmentation plus active des roches par le gel : cela est particulièrement net pour le Pléistocène terminal à Kalachaca mais aussi pour l'Holocène moyen à récent dans plusieurs sites de la Cordillère Orientale que nous n'avons pas décrits ici (rio Chuquiaguillo sur la route des Yungas).

Les nappes d'eau souterraine semblent donc avoir joué un rôle prépondérant dans l'hydrologie des vallées fluviatiles lors du dépôt des sédiments quaternaires relativement fins et souvent organiques. Or, nous avons montré que les sources sont actuellement plus nombreuses dans les régions de haute altitude, au-dessus de 4 500 m environ, où les neiges sont plus fréquentes que les pluies. C'est la rétention dans le tapis neigeux qui favorise l'infiltration et l'alimentation des nappes. En se développant plus largement à certaines époques du Quaternaire, les neiges ont pu entraîner une élévation du niveau des nappes, une alimentation des écoulements superficiels par des sources et une extension des tourbières dans les fonds de vallée. Parfois les neiges ont pu ne pas être assez abondantes pour permettre la recharge des aquifères, d'où un tarissement des sources et un assèchement plus ou moins partiel des fonds de vallée. C'est cette hypothèse que nous

retiendrons pour expliquer la réduction des tourbières à certaines époques.

L'extension des chutes de neige à des altitudes (4 000 m) où elles sont de nos jours absentes pendant la saison humide estivale pourrait se concevoir par une diminution de la température. En d'autres termes, il faudrait envisager, à ces altitudes, des conditions climatiques que l'on rencontre actuellement au-dessus de 4 500 m environ, ce qui correspondrait à un refroidissement d'au moins 4 °C environ par rapport à l'actuel. Cette hypothèse cependant n'est pas vraiment satisfaisante ; nous savons en effet que les neiges fondent rapidement de nos jours vers 4 500-5 000 m d'altitude et qu'elles entretiennent des écoulements de crue. De plus, le rôle des nappes d'eau souterraine dans l'alimentation des écoulements superficiels ne s'étend pas à l'ensemble du paysage : il reste ponctuel ou limité à quelques vallées situées dans des conditions géologiques favorables. Or nous savons que les crues étaient absentes au Quaternaire récent (phases B et D) et que les eaux souterraines ont alimenté des écoulements permanents dans de nombreuses vallées.

Une autre hypothèse sur la constitution du tapis neigeux semble concevable : les précipitations au lieu d'être centrées comme aujourd'hui, sur l'été austral, avaient lieu préférentiellement en hiver. Cette modification climatique permettrait une extension des neiges sur l'ensemble des Andes boliviennes, jusqu'à des altitudes relativement basses : 3 700 m, peut-être moins. Cela revient à privilégier, pour les époques considérées (phases B et D), les mécanismes météorologiques actuels qui engendrent en saison froide des chutes de neige exceptionnelles sur les hauts plateaux andins (SERVANT et VILLARROEL, 1979). Cette hypothèse n'exclut pas un refroidissement du climat. Des abaissements de la température moyenne annuelle, de l'ordre de 2 à 5 °C, sont effectivement décelés par l'étude des diatomées, notamment vers 3 200 ans B.P. (SERVANT-V., 1982 ; ROUX et SERVANT-V., 1984) et vers 9 000-10 000 ans B.P. (SERVANT-V., com. orale).

Finalement, nous aboutissons à un scénario paléoclimatique que nous résumerons de la manière suivante :

— Les périodes de réchauffement, avec des températures proches des valeurs actuelles, sont caractérisées par des précipitations saisonnières et orageuses. Elles se situent à l'Holocène récent (après 1 500 ans B.P.), à l'Holocène moyen (vers 6 000-7 000 ans B.P.) et au Pléistocène supérieur, après le dernier maximum glaciaire (vers 16 000-14 000 ou 13 000 ans B.P.). L'évaluation des hauteurs des précipitations, en valeurs moyennes annuelles, n'est pas possible, ici, par les méthodes géomorphologiques. Nous savons en effet que ce sont les forts orages, agents décisifs de la morphogénèse, qui

engendrent le ravinement des versants et le creusement des rivières, aussi bien dans les régions arides que dans les régions plus humides des Andes.

— Les périodes de refroidissement sont associées à un régime différent des précipitations : celles-ci avaient lieu principalement en hiver. Ces conditions climatiques prédominaient pendant les phases B (6 000-1 500 ans B.P. environ) et D (14 000 ou 13 000 ans -7 000 ans B.P. environ) du Quaternaire récent. Des épisodes brefs, à pluies orageuses, ont pu cependant s'intercaler au sein de ces phases climatiques. Nous en avons décelé un exemple, dans l'Holocène moyen, un peu avant 3 200 ans B.P. dans la Cordillère Orientale (Ichu-Khota).

Les hauteurs des précipitations sont, ici, comme dans le cas précédent, difficiles à évaluer. On peut cependant admettre que le tapis neigeux qui s'est alors étendu sur les Andes n'a jamais été très épais. Dans le cas contraire, il aurait en effet alimenté en été des écoulements à forts débits, ce qui n'est pas le cas. Globalement, les phases B et D sont climatiquement sèches. Seuls quelques épisodes, marqués par une extension des tourbières, pourraient correspondre à une atténuation de la sécheresse, ce qui s'est traduit par une recharge des aquifères.

CONCLUSIONS

La morphogénèse et la sédimentation fluviale des Andes boliviennes révèlent, au Quaternaire récent, des variations climatiques associant changements de température et modifications de la nature et du régime des précipitations. Au cours des 18 derniers millénaires, des conditions climatiques proches des conditions actuelles se sont manifestées pendant de brèves périodes, après le dernier pléni-glaciaire, vers 7 000 ans B.P. et depuis 1 500 ans B.P. environ. Les autres époques correspondent à des conditions particulières, sous climat plus froid que de nos jours, à précipitations d'hiver en moyenne faibles mais épisodiquement assez abondantes pour permettre une recharge des aquifères.

REMERCIEMENTS.

Ce travail a été réalisé dans le cadre des accords de coopération scientifique entre l'Université Majeure de San Andrés (UMSA) de La Paz et l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre Mer (O.R.S.T.O.M.). Nous remercions les autorités de l'UMSA pour les appuis qu'elles nous ont accordés. Nous remercions également les D^r LA. RODRIGO, O. BALLIVIAN et C. VARGAS qui ont dirigé l'Institut de Géodynamique et de Limnologie de l'UMSA et qui ont largement contribué à la réalisation de notre étude.

Manuscrit reçu au Service des Éditions de l'O.R.S.T.O.M., le 1^{er} mars 1984

Liste des échantillons datés par le ^{14}C (tourbes ou limons organiques)

N°Echantillons	Age ^{14}C Ans B.P.	Localisation	Lat.S.	Long.W.	Alt.m.
Y - 212	765 \pm 85	Rio de Chuquiaguillo	16°27'	68°17'	3900
MS-79-7	1000 \pm 90	Rio de Kollpana	17°21'	65°47'	3740
JA-8	1480 \pm 80	Quebrada Sorechata	16°22'	68°16'	4170
MS-465	1425 \pm 80	Rio Chuquiaguillo	16°27'	68°17'	3900
Y- 207	1560 \pm 80	Rio Chuquiaguillo	16°27'	68°17'	3900
MS-81-190	1550 \pm 60	Quebrada Sorechata	16°22'	68°16'	4190
MS-81-176	1560 \pm 80	Quebrada Sorechata	16°22'	68°16'	4190
MS-81-161	2250 \pm 75	Quebrada Kalachaca	17°28'	69°18'	4010
MS-J-150	3120 \pm 150	Khara-Khota	16°08'	68°21'	4365
MS-81-296	3375 \pm 95	Kaluyo(Choqueyapu)	16°26'	68°10'	4010
MS-455	3450 \pm 100	Rio San Francisco	15°51'	68°37'	4010
MS-81-123	4210 \pm 60	(Pampa Japu-Japu) Quebrada Kalachaca	17°28'	69°18'	4020
Y-194	4280 \pm 560	Rio Chuquiaguillo	16°27'	68°17'	3900
MS-81-101	4390 \pm 150	Rio Jaketa	17°33'	69°17'	3970
MS-454	4540 \pm 120	Rio San Francisco	15°51'	68°37'	4010
MS-81-121	4835 \pm 90	Quebrada kalachaca	17°28'	69°18'	4020
MS-81-215	5950 \pm 800	Quebrada Sorechata	16°22'	68°16'	4190
MS- 198	7730 \pm 125	Rio Totor Jokho Viluyo (Ballivian)	17°03'	68°26'	3960
Y-188	8330 \pm 170	Rio Chuquiaguillo	16°27'	68°17'	3900
Y-177	9065 \pm 280	Rio Chuquiaguillo	16°27'	68°17'	3900
MS-81-294	9210 \pm 220	Rio Kaluyo(Choqueyapu)	16°26'	68°10'	4010
MS-197	9435 \pm 110	Rio Totor Jokho Viluyo (Ballivian)	17°03'	68°26'	3960
MS-81-134	9695 \pm 220	Rio Kaluyo(Choqueyapu)	16°26'	68°10'	4010
MS-469	9820 \pm 120	Rio Chiarjahuiria	16°28'	68°17'	3990
MS-81-134	9850 \pm 140	Quebrada Kalachaca	17°28'	69°18'	4020
MS-80-15	9915 \pm 81	Rio Chuquiaguillo	16°26'	68°03'	4120
MS-81-133	10060 \pm 135	Quebrada Kalachaca	17°28'	69°18'	4020
M B 2	11465 \pm 165	Rio Jaketa	17°33'	69°17'	3970
MS-464	12350 \pm 100	Rio Chuquiaguillo	16°27'	68°17'	3900
MS-81-289	12800 \pm 100	Quebrada Sorechata	17°28'	69°18'	4220

MB-5	13280 ± 80	A l'Est de la Quebrada Kalachaca	17°28'	69°19'	4000
JA - 2	16000 ± 135	Rio Sorechata	16°21'	68°17'	4170
MS-79-2A	16610 ± 130	Rio Kollpana [~]	17°21'	68°48'	3700
MS-467	17370 ± 120	Chiarjahuirá	16°28'	68°17'	3990
Y-124	17750 ± 800	Quebrada Sorechata	17°28'	69°18'	4220
MS-79-4	26000 ± 1100	Rio Kollpana [~]	17°21'	68°48'	3700
MS-79-5	27000 ± 1200	Rio Kollpana [~]	17°21'	68°48'	3700
MS-121	31900 ± 800	Quebrada Sorechata	17°28'	69°18'	4220
MS-81-275	32800 ± 1600	Quebrada Sorechata	17°28'	69°18'	4020
MS-558	33520 ± 460	Rio San Francisco	15°51'	68°36'	4020
MS-453	35650 ± 500	Rio San Francisco	15°51'	68°36'	4020
MS-468	≥ 30.000	Chiarjahuirá	16°28'	68°17'	3990
MS-81-266	≥ 35.000	Quebrada Sorechata	16°28'	68°18'	4210
MS-117	≥ 37.000	Quebrada Sorechata	16°28'	68°18'	4220
MS-110	≥ 34.000	Quebrada Sorechata	16°28'	68°18'	4220
J.A.6.	≥ 40.000	Quebrada Sorechata	16°28'	68°18'	4160
JA 1	≥ 42.000	Rio Sorechata	16°21'	68°17'	4190
JA 3	≥ 42.500	Quebrada Sorechata	16°28'	68°18'	4160
Y.105	≥ 45.000	Quebrada Sorechata	16°28'	68°18'	4220

Prélèvements : JA : J. ARGOLLO ; MB : M. BLANCO ; MS : M. SERVANT ; Y : J.-P. YBERT. Analyses : J.-Ch. FONTES ; J.-F. SALIÈGE. Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie Isotopique, Université de Paris-Sud.

BIBLIOGRAPHIE

- ARGOLLO (J.), 1982. - Évolution du piedmont ouest de la Cordillère Royale (Bolivie) au Quaternaire. Thèse 3^e cycle, Univ. Aix-Marseille II, 110 p. et fig. h.-t.
- DOLLFUS (O.), LAVALLÉE (D.), 1973. - Ecología y ocupación del espacio en los Andes tropicales durante los últimos veinte milenios. *Bull. Inst. Fr. And.*, vol. II, n° 3 : 75-92.
- GRAF (K.), 1981. - Palynological investigations of two post-glacial peat-bogs near the boundary of Bolivia and Peru, *Journ. of Biogeography*, n° 8 : 353-368.
- MERGER (J. H.), PALACIOS (M.), 1977. - Radiocarbon dating of the last glaciation in Peru, *Geology*, v. 5 : 600-604.
- ROUX (M.), SERVANT-VILDARY (S.), 1984. - Comparaisons statistiques de peuplements de diatomées fossiles et actuelles provenant des montagnes de Bolivie. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Géol.*, vol. XIV, n° 1 :
- SERVANT (M.), FONTES (J. Ch.), 1978. - Les lacs quaternaires des hauts plateaux des Andes boliviennes. Premières interprétations paléoclimatiques. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. géol.*, vol. X, n° 1 : 9-23.
- SERVANT (M.), VILLARROEL (R.), 1979. - Le problème paléoclimatique des Andes boliviennes et de leurs piedmonts amazoniens du Quaternaire. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 228 : 665-668.
- SERVANT (M.), FONTES (J. C.), ARGOLLO (J.), SALIÈGE (J. F.), 1981. - Variations du régime et de la nature des précipitations au cours des 15 derniers millénaires dans les Andes de Bolivie. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 292 : 1209-1212.
- SERVANT-VILDARY (S.), 1982. - Altitudinal zonation of mountainous diatom flora in Bolivia. Application to the study of the Quaternary. *Acta Geol. Acad. Scient. Hungarica*, 25 (n° 1-2) : 179-210.
- YBERT (J. P.), 1981-1982. - Analyse palynologique de la coupe holocène du rio Chiarjahuirá sur l'Altiplano bolivien. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. géol.* vol. XII, n° 2 : 125-133.
- YBERT (J. P.), 1984. - Diagramme sporo-pollinique de la coupe holocène du rio Chuquiaguillo sur l'Altiplano bolivien. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. géol.* vol. XIV, n° 1.