

Évolution du régime tectonique de l'Altiplano et de la Cordillère orientale des Andes de Bolivie du Miocène supérieur à l'Actuel Un effet des forces de gravité et des forces aux limites

Alain LAVENU ⁽¹⁾ et Jacques-Louis MERCIER ⁽²⁾

Résumé : Les Andes de Bolivie sont situées au-dessus d'un segment de la zone de subduction andine dont le pendage est voisin de 30°. Elles sont caractérisées par l'existence d'un grand bassin subsident (l'Altiplano) bordé par des failles, par un brusque changement des directions structurales de la chaîne correspondant au coude d'Arica-Santa Cruz et par un volcanisme calco-alcalin cénozoïque à actuel. Ce travail concerne l'étude des changements du régime tectonique de l'Altiplano bolivien et de la Cordillère orientale depuis le Miocène supérieur. Au Miocène terminal, vers 7-8 Ma, une compression de direction NE-SW affecte la région. Durant le Pliocène, entre 6 et 3 Ma, la Haute Chaîne est soumise à une extension E-W. Au Pliocène terminal-Pléistocène inférieur, vers 3-2 Ma, une compression de direction voisine de E-W se développe dans l'ensemble de la région étudiée, mais certaines failles montrent une cinématique compatible avec un raccourcissement N-S sans qu'une chronologie constante entre les raccourcissements E-W et N-S ait pu être établie. Enfin du Quaternaire à l'Actuel, toute la Haute Chaîne est affectée par une extension de direction N-S à NNE-SSW tandis que les régions basses subandines sont soumises à une compression de direction E-W.

Ces changements du régime tectonique sont interprétés comme résultant de variations de la magnitude des forces aux limites, dues à la poussée de la plaque subductante sur la lithosphère andine, et des forces de volume, dues à la haute topographie, à l'épaisseur crustale et au manteau de faible densité sous-jacent. Dans ce modèle on considère que la contrainte lithosphérique horizontale maximale (σ_{Hmax}), de direction E-W approximativement parallèle à la convergence, est à peu près constante et que la contrainte lithosphérique verticale (σ_{zz}) augmente avec la topographie. Ainsi, pour le régime Quaternaire-Actuel, dans les régions basses de la zone subandine la tectonique est compressive : σ_{Hmax} est σ_1 et σ_{zz} est σ_3 . Dans la Haute Chaîne, σ_{zz} augmente avec la topographie et devient σ_1 ; donc la contrainte horizontale maximum (σ_{Hmax}) de direction E-W devient σ_2 et la contrainte horizontale minimum (σ_{Hmin}), orthogonale à σ_{Hmax} , devient σ_3 , permettant une extension suivant la direction N-S. En supposant que la rhéologie de la lithosphère andine n'a pas changé de façon significative depuis 5 Ma, et que depuis le Miocène supérieur l'altitude des Andes n'a pas beaucoup changé, il faut admettre que ce sont les forces aux limites qui ont diminué durant le Pliocène pour permettre une extension E-W et augmenté au cours du Pliocène terminal-Pléistocène ancien pour permettre une compression E-W dans la Haute Chaîne. Il est proposé à titre d'hypothèse que ces changements sont la conséquence de variations du pendage de la plaque subductante au cours du temps.

Mots clés : Régime tectonique - Néogène - Bolivie.

(1) UR 1H, Orstom, 213, rue La Fayette, 75480 Paris cedex 10 et Lab. de géodynamique et modélisation des bassins sédimentaires, IPRA, université de Pau et des Pays de l'Adour, av. de l'Université, 64000 Pau.

(2) UA (1369 CNRS) Géophysique et Géodynamique interne, Lab. de géologie dynamique interne, bât. 509, université de Paris-Sud, 91405 Orsay cedex.

Abstract: Evolution of the tectonic regime of the Altiplano and the eastern Cordillera of the Bolivian Andes from upper Miocene to Present-day: an effect of the gravitational body forces and the boundary forces. The Bolivian Andes are located above a 30° dipping segment of the Andean subduction zone. They are characterized by a large subsident sedimentary basin bounded by faults, by a rapid change in the structural trend of the Andean belt which corresponds to the Arica-Santa Cruz elbow-line and a calc-alkaline Cenozoic to Present volcanism. This paper addresses the changes in the tectonic regime of the Bolivian Altiplano and Eastern Cordillera since the Upper Miocene. During the uppermost Miocene ($\approx 7-8$ Ma) this region is submitted to a NE-SW trending compression. During the Pliocene (≈ 6 to 3 Ma), the High Andes are submitted to an E-W trending extension. During the uppermost Pliocene-lower Pleistocene ($\approx 3-2$ Ma) an E-W trending compression affects this region. Yet, some faults exhibit kinematics which are in agreement with a N-S shortening. It has not been possible to demonstrate a clear chronology between these two N-S and E-W trending shortenings. Finally, during the mid-late Pleistocene and Present-day, the High Andes are submitted to a N-S to NNE-SSW trending extension while the Sub-andean lowlands are submitted to an E-W trending compression.

These changes in the tectonic regimes are interpreted as resulting from a balance between boundary forces due to the slab push on the Andean lithosphere and body forces due to the high topography, the crustal thickness and the low density mantle beneath. In this model it is considered that the lithospheric horizontal maximum stress (σ_{Hmax}), trending E-W approximately parallel to the convergence, is fairly constant and that the vertical stress (σ_{zz}) increases with the topography. Concerning the Quaternary-Present day tectonic regime, in the Sub-andean lowlands, tectonics are compressional: σ_{Hmax} is σ_1 and σ_{zz} is σ_3 . In the High Andes, the σ_{zz} value increases with the topography and becomes σ_1 ; thus σ_{Hmax} becomes σ_2 and the minimum horizontal stress (σ_{Hmin}), orthogonal to σ_{Hmax} , becomes σ_3 allowing extension to occur in a N-S trending direction. Supposing that the rheology of the Andean lithosphere has not significantly changed since 5 Ma, as the altitude of the Andes above sea level has not significantly changed since the upper Miocene, variations of the magnitude of the boundary forces are necessary to explain the changes in the Andean tectonic regime. Magnitude decreased during the Pliocene to permit an E-W trending extension and increased during the upper Pliocene-lower Pleistocene to permit an E-W trending compression. It is surmised that such changes are related to changes in the dip-angle of the subducting slab during time.

Key words: Tectonic regime - Neogene - Bolivia.

Resumen: Evolución del régimen tectónico del Altiplano y de la Cordillera oriental de los Andes de Bolivia del Mioceno superior al Presente: un efecto de las fuerzas de gravedad y de las fuerzas a los límites. Los Andes de Bolivia se encuentran encima de un segmento de la zona de subducción andina cuyo buzamiento está cercano a 30°. Se caracteriza por la existencia de una gran cuenca subsidente, el Altiplano, limitada por fallas, por un cambio brusco de las direcciones estructurales de la cadena que corresponde a la deflexión de Arica-Santa Cruz y por un volcanismo calco-alcálico cenozoico a actual. Este trabajo concierne los cambios del régimen tectónico del Altiplano boliviano y de la Cordillera oriental, desde el Mioceno superior. Al Mioceno terminal, hacia 7-8 Ma, la región sufre una compresión NE-SW. Durante el Plioceno, entre 6 y 3 Ma, la Alta Cadena sufre una extensión E-W. Al Plioceno terminal-Pleistoceno inferior, hacia 3-2 Ma, una compresión de dirección cercana a E-W afecta a toda la región estudiada, pero algunas fallas muestran una cinemática compatible con un acortamiento N-S sin que se establezca una cronología constante entre los acortamientos E-W y N-S. Por fin, del Cuaternario al Presente, toda la Alta Cadena está afectada por una extensión de dirección N-S a NNE-SSW mientras que las regiones bajas subandinas sufren una compresión de dirección E-W.

Estos cambios del régimen tectónico se interpretan como el resultado de variaciones de la magnitud de fuerzas a los límites, debidas al empuje de la placa subductante sobre la litosfera andina, y de las fuerzas de volumen debidas a la alta topografía, al espesor de la corteza y a la baja densidad del manto subyacente. En este modelo, se considera el esfuerzo litosférico horizontal máximo (σ_{Hmax}), de dirección E-W aproximadamente paralelo a la convergencia, más o menos constante y el esfuerzo litosférico vertical (σ_{zz}) aumentando con la topografía. Así, en las regiones bajas de la zona subandina, el régimen tectónico del Cuaternario-Presente se encuentra compresivo: σ_{max} es σ_1 y σ_{zz} es σ_3 . En la Alta Cadena, σ_{zz} aumenta con la topografía y se vuelve σ_1 ; entonces el esfuerzo horizontal máximo (σ_{Hmax}) de dirección E-W se vuelve σ_2 y el esfuerzo horizontal (σ_{Hmin}), perpendicular a σ_{Hmax} , se vuelve σ_3 , favoreciendo una extensión de dirección N-S. Suponiendo que la reología de la litosfera andina no cambió de manera significativa desde 5 Ma, y como desde el Mioceno superior la altitud de los Andes no cambió mucho, es preciso admitir que las fuerzas a los límites han disminuido durante el Plioceno permitiendo una extensión E-W y han aumentado durante el Plioceno terminal-Pleistoceno antiguo, permitiendo una compresión E-W en la Alta Cadena. Se propone como hipótesis que esos cambios son consecuencia de variaciones del buzamiento de la placa subductante a lo largo del tiempo.

Palabras claves: Régimen tectónico - Neógeno - Bolivia.

INTRODUCTION

Le segment des Andes de Bolivie (Fig. 1) est situé au-dessus d'une zone de subduction dont le pendage est proche de 30° ; il est en cela différent des segments du Pérou central et du « Norte Chico » du Chili, où le plan de subduction est proche de l'horizontale (STAUDER, 1975 ; BARAZANGI et ISACKS, 1976 ; SACKS, 1977 ; GRANGE *et al.*, 1984). Les trois traits caractéristiques des Andes de Bolivie sont l'existence d'un grand bassin sédimentaire fortement subsident qui forme une haute plaine, l'Altiplano, un brusque changement de directions structurales andines formant le coude d'Arica-Santa Cruz et la présence d'un volcanisme calco-alcalin tertiaire et quaternaire toujours actif.

SÉBRIER *et al.* (1985) ont décrit l'état de contrainte régional quaternaire dans le segment des Andes au Sud-Pérou et l'ont interprété comme résultant d'une compression horizontale liée à la subduction, associée à un accroissement de la contrainte verticale dans les hautes Andes due à un effet de haute topographie. Cet état de contrainte est en accord avec les résultats obtenus sur l'Altiplano bolivien (LAVENU, 1977, 1978, 1981a, 1981b, 1981/82, 1986) que nous présentons ici : le régime tectonique actuel y est en extension suivant une direction N-S comme au Sud-Pérou tandis qu'il est en compression suivant une direction E-W dans les régions basses de la zone subandine (CHINN et ISACKS, 1983). Le but de ce travail est de préciser l'évolution du régime tectonique de l'Altiplano bolivien depuis le Miocène, grâce à une bonne chronologie des dépôts sédimentaires et volcano-sédimentaires continentaux, datés soit par radiochronologie soit par des faunes de vertébrés, et de comparer l'évolution de ce régime tectonique à celui des bassins d'âge néogène de la Cordillère orientale.

SCHÉMA STRUCTURAL DES HAUTES ANDES DU NORD-OUEST DE LA BOLIVIE

La zonation morphostructurale des hautes Andes de Bolivie

À la latitude de la Bolivie, on peut distinguer dans les Andes centrales trois zones morphostructurales principales (Fig. 1). Les basses terres pacifiques (altitude inférieure à 2 500 m) comprennent la Cordillère de la côte et le piémont pacifique (au Pérou et au Chili). Les hautes Andes (altitude comprise entre 2 500 et 6 000 m) sont constituées par la Cordillère occidentale, l'Altiplano et la Cordillère

orientale. Les basses terres amazoniennes (altitude inférieure à 2 500 m) comprennent la zone subandine, la plaine du Chaco-Beni et le bouclier brésilien. Un caractère marquant des hautes Andes boliviennes réside dans un changement net des directions morphostructurales. La chaîne est orientée 120° N dans le sud du Pérou, le nord de la Cordillère orientale de Bolivie et le nord du Chili (Fig. 1) et prend une direction N-S plus au sud. Ce changement de direction se produit entre 18° et 20° de latitude sud ; il correspond à l'« Elbow-line de Santa Cruz » de AHLFELD (1967). Celui-ci est caractérisé par une zone de linéaments transverses, de direction 80° N à 100° N, remarquée par de nombreux auteurs (AHLFELD et BRANISA, 1960 ; RADELLI, 1966 ; BROCKMANN *et al.*, 1972 ; MARTINEZ, 1980) qui a été considérée comme une zone d'importants décrochements senestres (SHEFFELS et KLEPACKI, 1985 ; LAVENU, 1986 ; SEMPÉRÉ et HÉRAIL, 1987).

L'Altiplano qui est plus particulièrement analysé dans ce travail est une vaste dépression fermée (altitude moyenne de 3 700 m) qui s'étend du sud du Pérou à la Puna argentine. Il correspond à un bassin tertiaire fortement subsident, à sédimentation continentale. Comme dans toutes les Andes centrales, de façon générale, les dépôts sédimentaires continentaux, postérieurs à l'Éocène supérieur (40 Ma) y sont constitués par de grandes séquences séparées par des discordances angulaires. Celles-ci sont la conséquence des grandes pulsations tectoniques compressives suivantes (Fig. 2) : F2 (≈ 26 Ma), F3 (≈ 17 Ma) reconnues dans le sud du Pérou (SÉBRIER *et al.*, 1979), F4 ($\approx 8-7$ Ma) et F5 ($\approx 3-2$ Ma). On distingue ainsi, durant la période étudiée, des séquences sédimentaires d'âge oligocène supérieur-miocène, pliocène et quaternaire. L'épaisseur des dépôts oligocènes à quaternaires est souvent surévaluée (plus de 15 000 m, MEYER et MURILLO, 1961 ; RODRIGO et CASTAÑOS, 1975 ; MARTINEZ, 1980). Nous avons retenu une épaisseur plus faible (LAVENU et MAROCCO, 1984) car le caractère progradant de la sédimentation et l'existence de déformations tectoniques (plis et failles) laissent à penser que l'épaisseur de ces dépôts ne dépasse probablement pas 6 000 à 8 000 m.

Le volcanisme calco-alcalin tertiaire et quaternaire est présent dans la Cordillère occidentale (Fig. 1). Dans le sud de l'Altiplano bolivien, un volcanisme shoshonitique s'étend, vers l'est, jusqu'à la Cordillère orientale (KUSSMAUL *et al.*, 1975).

LE CADRE STRUCTURAL DU NORD-OUEST BOLIVIEN

Le Nord-Ouest bolivien est affecté par des failles normales (Fig. 3). Les failles de direction E-W sont souvent disposées en échelon, selon une direction

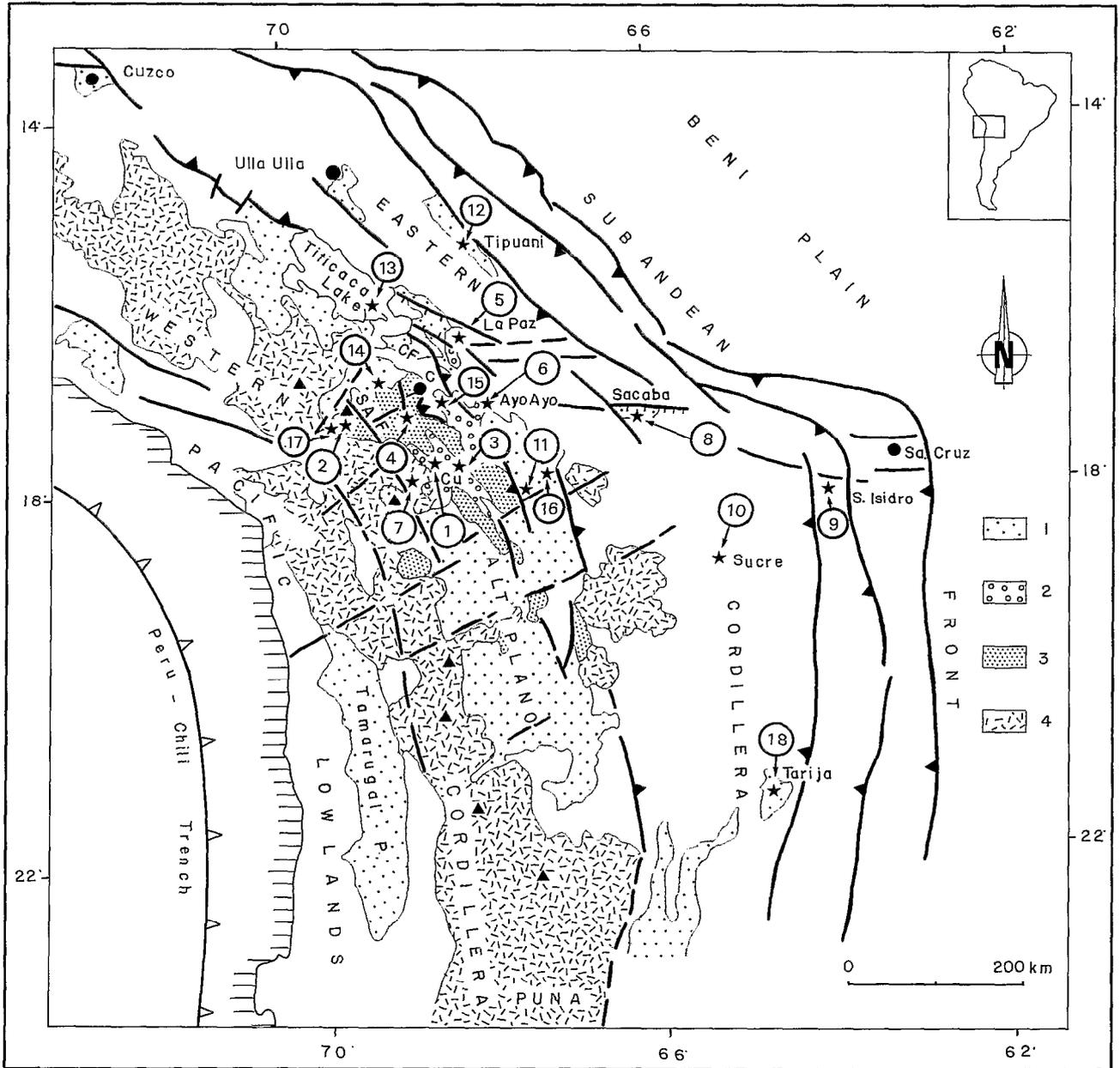


Fig. 1. — Schéma structural des Andes centrales de Bolivie.

1 : Quaternaire de la Cordillère (dans la zone subandine et la plaine du Beni le Quaternaire n'est pas différencié) ; 2 : Pliocène de l'Altiplano ; 3 : Oligo-Miocène ; 4 : Volcanisme cénozoïque (les triangles noirs représentent les principaux volcans quaternaires). Les chiffres portés à côté des étoiles donnent les numéros des sites de mesure de failles et de plis. C : Corocoro, Cu : Curahuara, SAF : faille de San Andres, CF : faille de Coniri.

Schematic structural map of the Central Andes of Bolivia.

1 — Cordilleran Quaternary deposits (in the subandean zone and Beni Plain Quaternary deposits are undifferentiated); 2 — Pliocene rocks of Altiplano; 3 — Oligocene-Miocene sediments; 4 — Cenozoic volcanites (black triangles represent the main Quaternary volcanoes). Numbers closed to stars indicate the sites of analysed faults and folds; C: Corocoro, CU: Curahuara, SAF: San Andres Fault, CF: Coniri Fault.

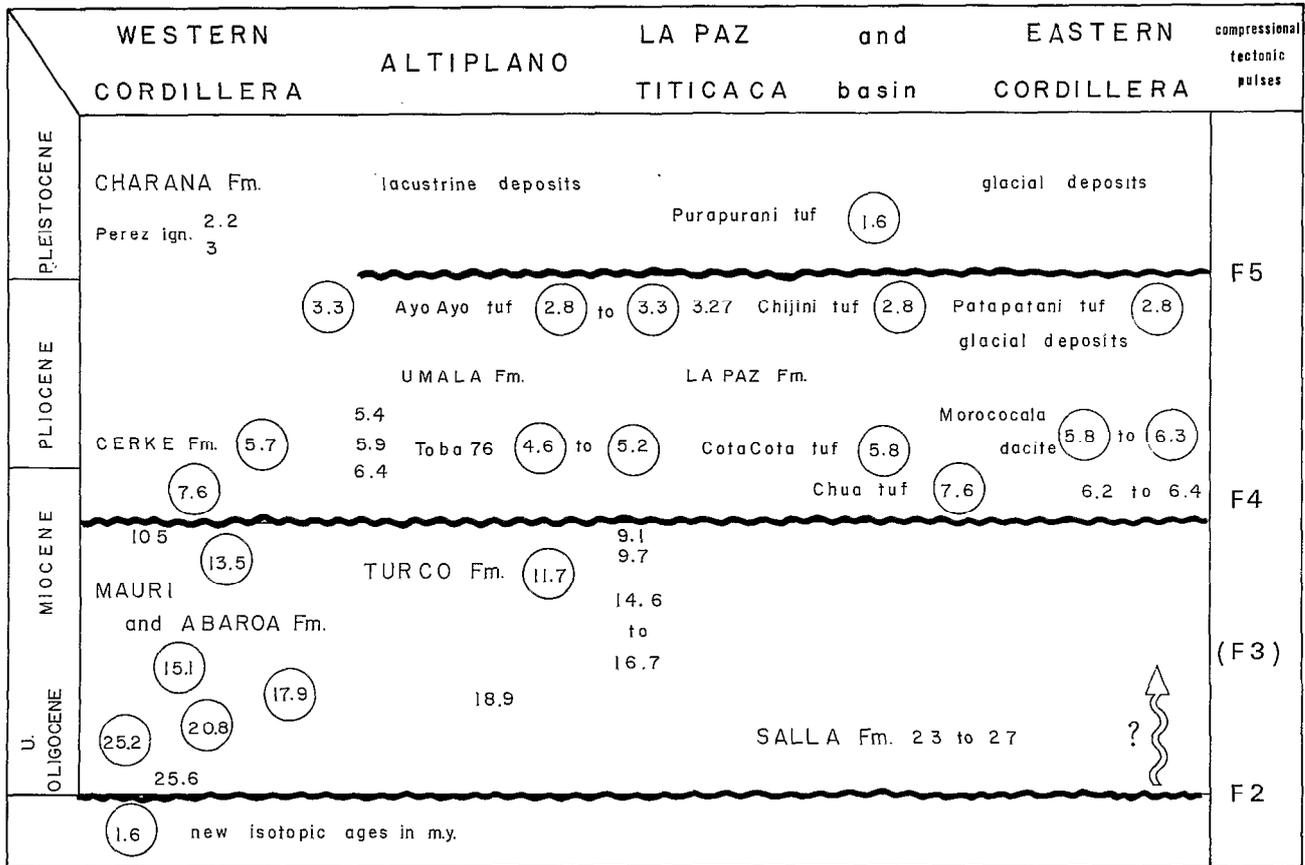


Fig. 2. — Tableau des corrélations stratigraphiques et tectoniques du nord de la Bolivie. Les chiffres cerclés correspondent aux âges radiométriques obtenus par LAVENU *et al.* (1989).
Table of stratigraphical and tectonic correlations from Northern Bolivia.

120° N à 130° N (bassin de La Paz, région de Carahuara) ; elles recoupent le Quaternaire. Les failles morphologiquement les mieux marquées, de direction 120° N et N-S, respectivement au nord et au sud du coude d'Arica-Santa Cruz, limitent le bassin subsident de l'Altiplano. À l'ouest, la limite structurale entre l'Altiplano et la Cordillère occidentale est très nettement marquée par la faille de San Andres (Fig. 3). À l'est, la limite structurale entre l'Altiplano et la Cordillère orientale est aussi marquée par une famille de failles. Ces failles sont souvent figurées en failles normales. Pour l'époque miocène, il était généralement admis, sans preuves, que le dépôt continental, en bassin peu profond, de faciès fluvio-lacustre à évaporitique, était lié à une subsidence en régime extensif. Par contre, l'existence d'une tectonique synsédimentaire en extension, d'âge pliocène, a été prouvée.

Cependant, des structures compressives, plis et failles inverses, affectant l'Oligo-Miocène et le Pliocène, sont aussi observables en de nombreux endroits de l'Altiplano (Fig. 3). Elles sont la conséquence de plusieurs événements tectoniques compressifs (MARTINEZ, 1980 ; SEMPÉRÉ *et al.*, 1990, 1991) et sont analogues à celles signalées plus au sud dans la Puna argentine (ISACKS *et al.*, 1982 ; ALLMENDINGER *et al.*, 1983 ; JORDAN *et al.*, 1983). Toutefois, nos données montrent que l'état de contrainte quaternaire et actuel est extensif au moins dans l'Altiplano.

Ainsi, une évolution tectonique complexe, en extension et compression, caractérise les Andes de Bolivie ; cette évolution du Miocène supérieur à l'Actuel est analysée dans les paragraphes suivants.

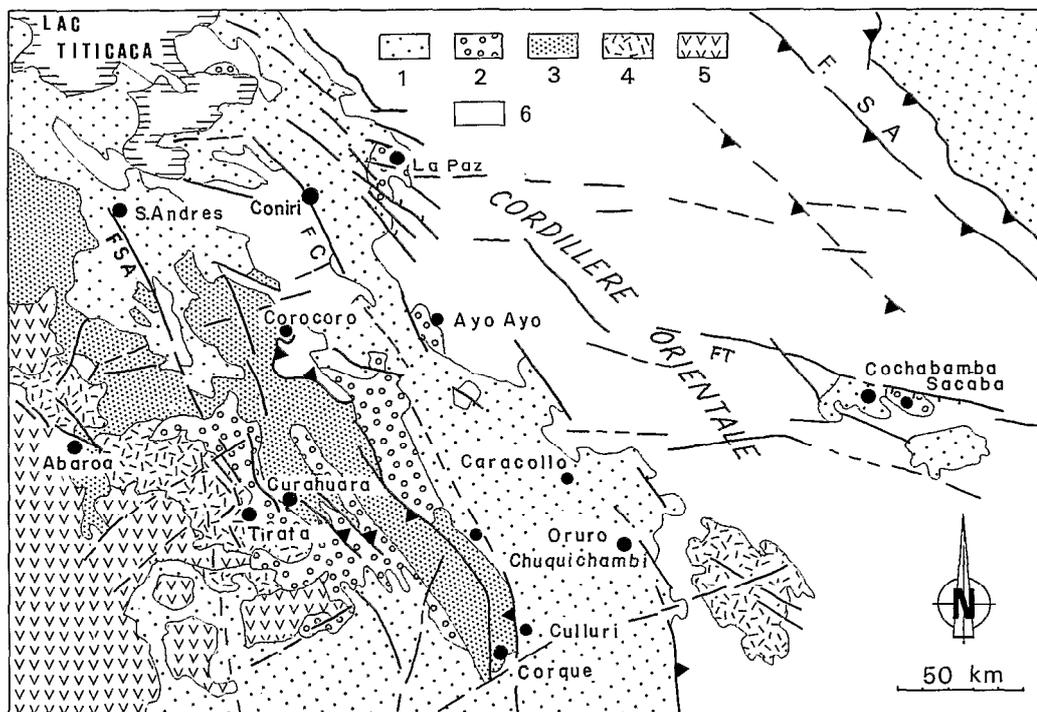


Fig. 3. — Schéma géologique du nord-ouest de la Bolivie.

Sédiments quaternaires (1), pliocènes (2) et oligo-miocènes (3), volcanisme pliocène (4) et quaternaire (5), terrains antérieurs à l'Oligo-Miocène (6). FSA : faille de San Andres, FC : faille de Coniri, FT : faille de Tunari, FSA : front subandin.

Geological sketch map of Northwestern Bolivia.

1 — Sediments of quaternary age; 2 — Pliocene age; 3 — Miocene age; 4 — Pliocene volcanites; 5 — Quaternary volcanites. In white: Pre-Oligocene — Miocene formations. FSA: San Andres fault, FC: Coniri fault, FT: Tunari Fault, FSA: subandean front.

L'ÉTAT DE DÉFORMATION DE L'ALTIPLANO BOLIVIEN AVANT LE MIOCÈNE TERMINAL

Les corrélations stratigraphiques des Andes du nord-ouest de la Bolivie sont résumées sur la figure 2. Des événements compressifs séparent des périodes de sédimentation dans des bassins subsidents. Avant 26 Ma (phase F2), un bassin d'âge paléogène était situé sur la bordure orientale de l'Altiplano. Des dépôts épais (ASCARRUNZ, 1973 ; RODRIGO et CASTANOS, 1975) témoignent du soulèvement de la Cordillère orientale par rapport à l'Altiplano au cours de cette période. D'autres petits bassins intramontagneux d'âge oligo-miocène sont situés à la bordure ouest de la Cordillère orientale. Le plus important est celui de Salla dans lequel se sont déposés 500 m de dépôts déséadiens, Oligocène supérieur-Miocène (HOFFSTETTER *et al.*, 1972 ; McFADDEN *et al.*, 1985 ; NAESER *et al.*, 1987 ; SWANSON *et al.*, 1987). Entre \approx 26 et 7 Ma (phases F2 et F4), un bassin oligo-miocène occupait l'ensem-

ble de l'Altiplano. L'épaisseur maximale des sédiments atteint 6 000 à 8 000 m, témoignant d'une forte subsidence. Ce bassin est dissymétrique, la plus grande épaisseur de sédiments se trouvant dans la partie orientale de l'Altiplano. Le taux moyen de sédimentation est peu supérieur à 0,1 mm par an sur le piémont de la Cordillère occidentale ; il peut atteindre 0,3 à 1 mm par an au pied de la Cordillère orientale.

Le régime tectonique des bassins subsidents oligocènes et miocènes de l'Altiplano a toujours été discuté : la grande épaisseur des sédiments a fait penser qu'il pouvait être extensif (LAVENU et MAROCCO, 1984) pendant les périodes séparées par les phases de compression démontrées par MARTINEZ (1980) et LAVENU (1986). Toutefois certains auteurs estimaient qu'une tectonique en compression synsédimentaire pouvait avoir été active durant tout l'Oligo-Miocène (LABROUSSE et SORIA, 1987). Des travaux récents (SEMPÉRÉ *et al.*, 1990, 1991) sur la bordure orientale de l'Altiplano ont montré

l'existence de chevauchements sur le Tertiaire de l'Altiplano au cours de l'Oligocène supérieur-Miocène inférieur (27-19 Ma). L'activité de décrochements compressifs et de chevauchements a été aussi montrée dans le sud de l'Altiplano (BABY *et al.*, 1990). Elle est considérée comme étant synchrone de la formation de bassins d'avant-pays d'âge oligocène supérieur-miocène inférieur (Formation San Vicente) et miocène moyen à supérieur (Formation Quehua). Cela suggère donc une sédimentation en régime tectonique compressif au cours de l'Oligocène-Miocène. Mais il est clairement établi (LAVENU, 1986) que des déformations en extension affectent l'Altiplano au cours du Pliocène et du Quaternaire moyen-récent.

C'est essentiellement entre l'Oligocène supérieur et le Miocène terminal que les Andes ont acquis leur altitude élevée (SÉBRIER *et al.*, 1988a).

LES RÉGIMES TECTONIQUES EN COMPRESSION DANS LE NORD DE L'ALTIPLANO DU MIOCÈNE TERMINAL AU QUATERNAIRE

La tectonique en compression d'âge miocène terminal (phase F4)

Des formations d'âge oligocène supérieur et miocène affleurent largement sur l'ensemble de l'Altiplano bolivien, au nord de 18° 30' de latitude sud (DOUGLAS, 1914 ; BERRY, 1922 ; SIRVAS et TORRES, 1966). Elles sont plissées dans une bande de direction NNW-SSE située au voisinage de la grande faille San Andres, entre San Andres et Corque et à l'ouest d'Abaroa (Fig. 3). À l'ouest et à l'est de cette bande, les formations pliocènes reposent en concordance sur les terrains oligo-miocènes,

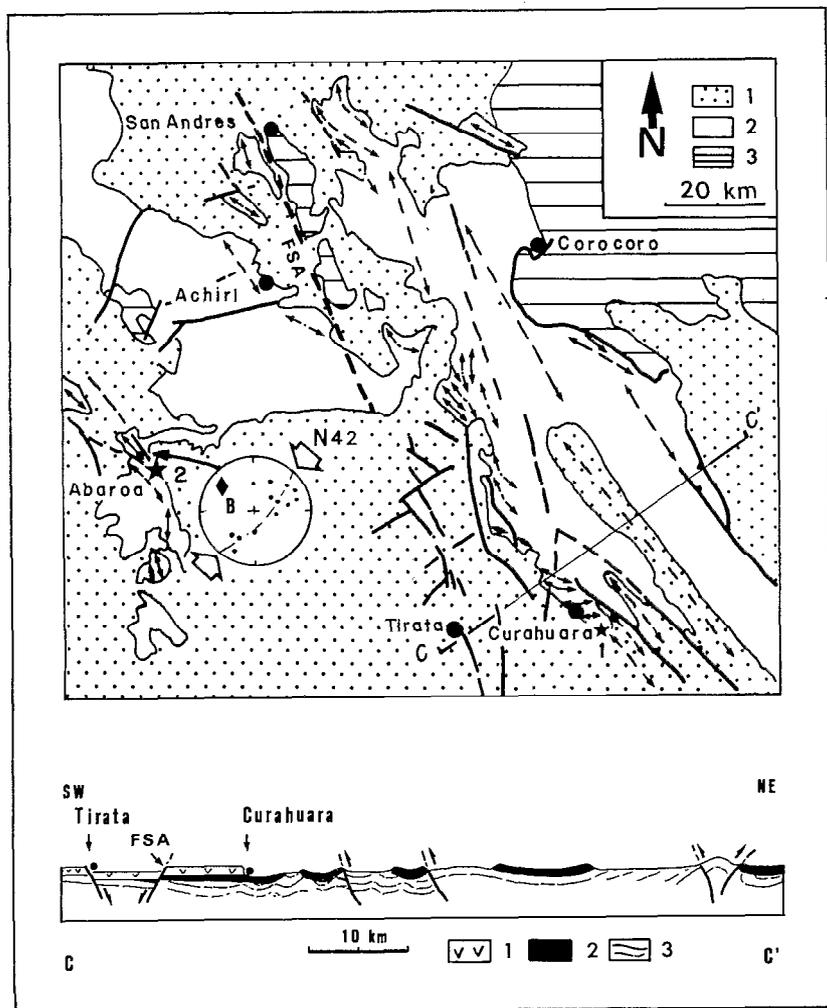


Fig. 4. — Plissement affectant les formations d'âge oligocène supérieur à miocène dans le nord de l'Altiplano (phase F4).

Carte : 1 — Plio-Quaternaire, 2 — Oligo-Miocène, 3 — terrains antérieurs à l'Oligo-Miocène. Les doubles flèches indiquent les axes des plis.

Coupe CC' : Le Miocène (3) est recouvert en discordance par le Pliocène (2), mais dans les zones peu affectées par la phase F4, le Pliocène est concordant sur le Miocène. À Curahuara, l'ignimbrite Perez (1) recouvre en discordance les sédiments pliocènes. FSA : réseau de la faille San Andres.

Folding of sediments of late oligocene and miocene age in Northern Altiplano (pulse F4). Map: 1 — Plio-quaternary sediments; 2 — Oligo-miocene; 3 — Pre-Oligocene — miocene deposits. Double arrows indicate the fold axis. Cross section CC': Miocene deposits (3) are unconformably overlain by pliocene sediments (2). Pliocene sediments overlay conformably the Miocene where the pulse F4 is weak. Near Curahuara, the Perez ignimbrite (1) overlies unconformably the pliocene sediments. FSA: San Andres fault.

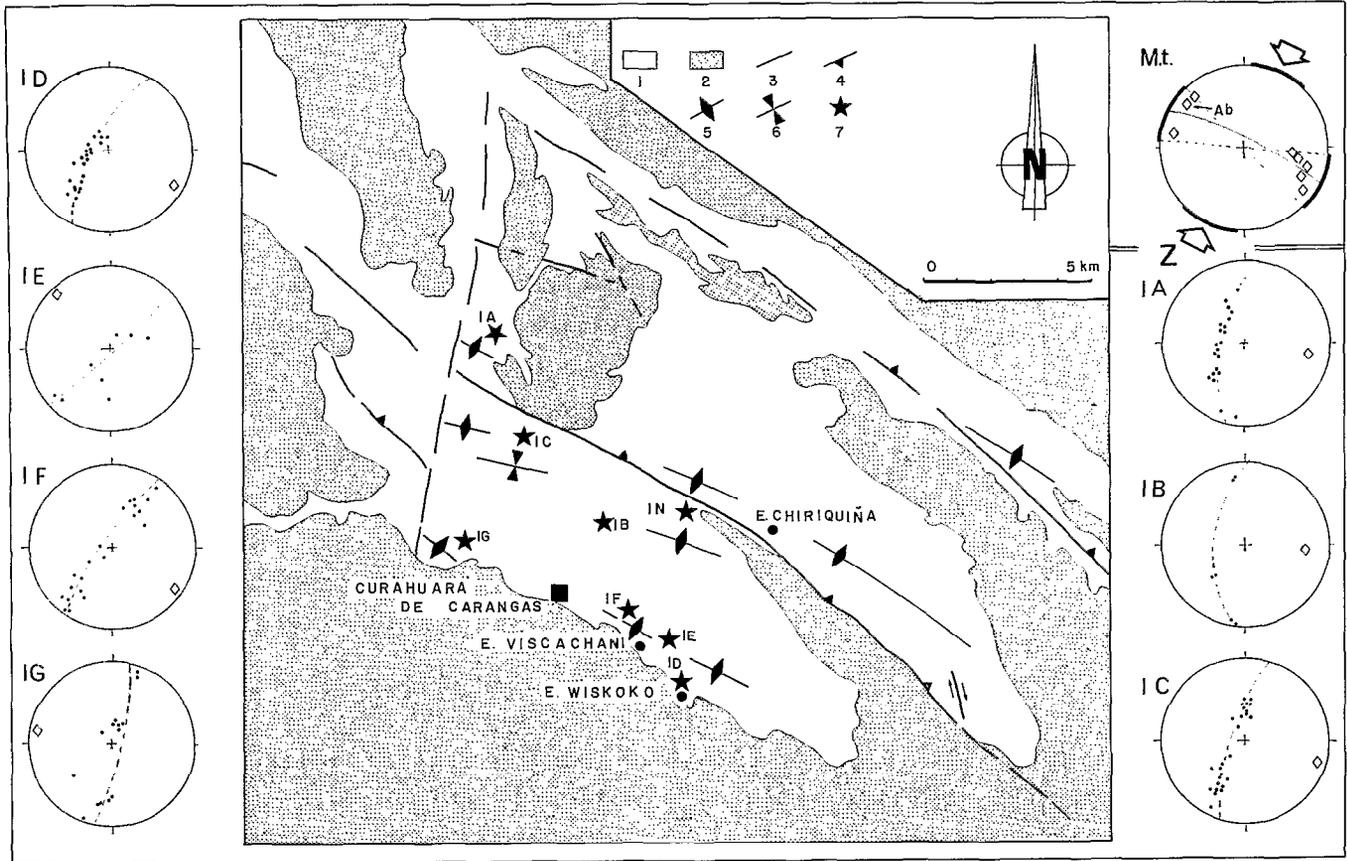


Fig. 5. — Schéma structural de la région de Curahuara, Altiplano Nord (phase F4, Miocène terminal).

Carte : 1 — Miocène, 2 — Plio-Quaternaire, 3 — failles indifférenciées, 4 — failles inverses, 5 — anticlinal, 6 — synclinal, 7 — sites de mesures.

Diagrammes (projection Schmidt inférieure) : les numéros des diagrammes correspondent aux numéros des sites. Les points représentent les pôles de stratification ; ceux-ci se répartissent sur un grand cercle (en tirets) dont le pôle (losange) indique l'axe B du pli. Le diagramme (Mt) regroupe les axes de plis (1A à 1G) plus celui mesuré à Abaroa (site 2, Fig. 4). Le trait épais indique la direction moyenne des axes B des plis et le dièdre limité par des lignes discontinues donne l'incertitude sur cette direction ; Z (25° N) est la direction moyenne de raccourcissement de la phase F4 dans cette région.

Schematic structural map of Curahuara zone, in northern Altiplano (pulse F4, late Miocene).

Map: 1 — Miocene; 2 — Plio-Quaternary; 3 — Undifferentiated faults; 4 — Reverse faults; 5 — Anticlinal; 6 — Synclinal; 7 — Analysed faulted sites.

Stereonet: (Schmidt, lower hemisphere); numbers of stereonets correspond to site numbers. Points indicate the stratification poles. They are located on a great circle (dashed line). Rhomb indicates the B axis of fold. Stereonet Mt shows all the fold axes (1A to 1G) and this measured near Abaroa (site 2, Fig. 4). The black line indicates the main direction of B axis and the dashed diedral indicates error of measurement; Z (N25°) is the main shortening direction of the pulse F4 in this zone.

l'ensemble étant affecté seulement par des ondulations à grand rayon de courbure.

Dans la région de Curahuara (Fig. 4 et 5) le Pliocène, lui-même plissé, repose en discordance sur le Miocène (sites 1N, 1E, 1F, Fig. 5) ; la discordance angulaire atteint 80° au site 1C. Cela implique l'existence de deux phases de plissement, l'une (F4) post-Miocène - anté-Pliocène, l'autre (F5) post-Pliocène (MARTINEZ, 1980 ; MEYER et MURILLO, 1961).

Dans la région d'Abaroa (Fig. 4) des sédiments volcano-sédimentaires oligo-miocènes plissés et faillés (LAVENU *et al.*, 1989) sont recouverts en discordance par un ensemble volcanique comprenant à la base la Formation Cerke (Fig. 2), d'âge pliocène (EVERNDEN *et al.*, 1966, 1977). L'âge du sommet des sédiments miocènes plissés du centre de l'Altiplano a pu être précisé par des datations radiochronologiques faites sur le tuf Ulloma à

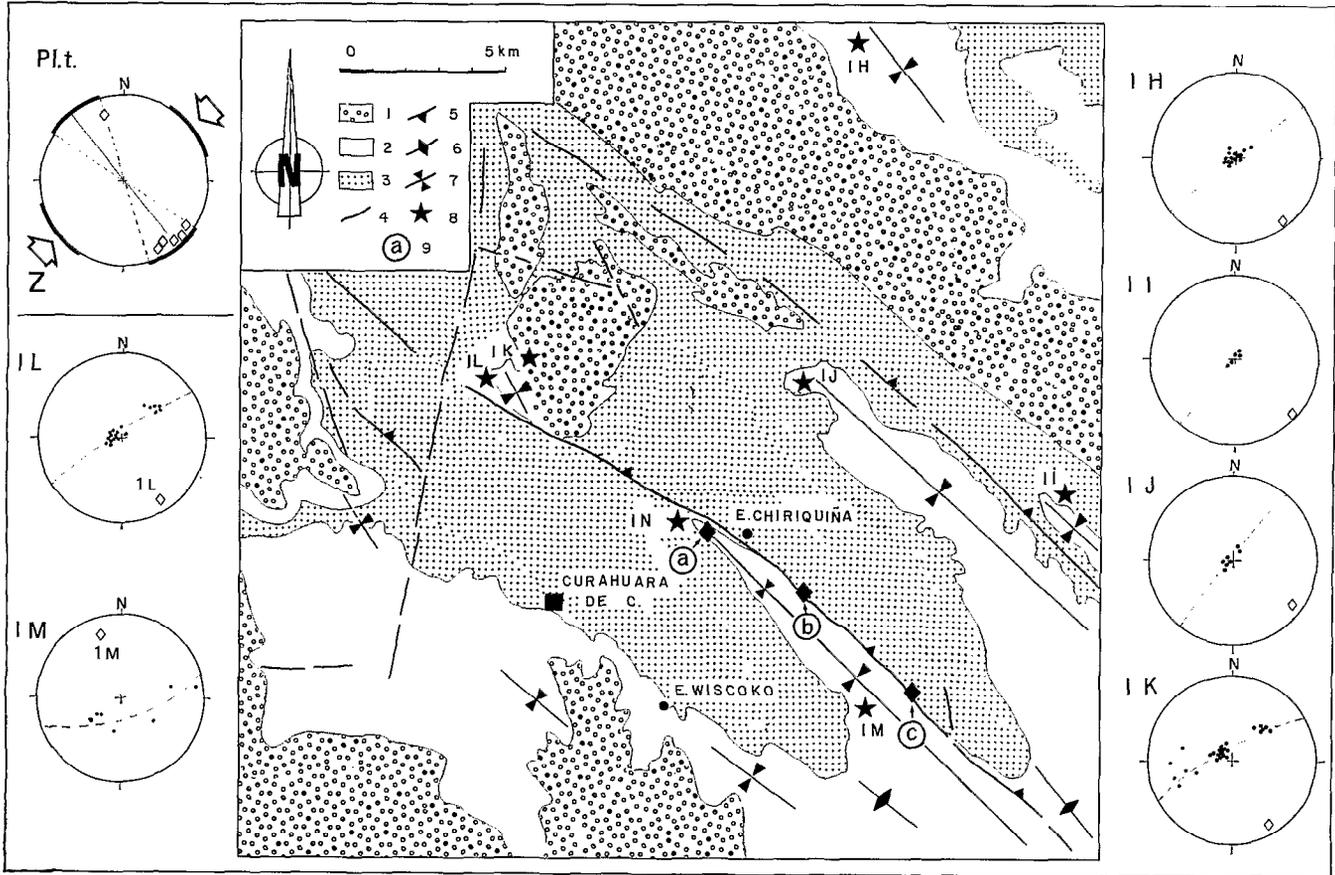


Fig. 6. — Schéma structural de la région de Curahuara, Altiplano Nord (phase F5, Pliocène terminal).

Carte : 1 — Plio-Quaternaire sédimentaire et volcanique (Ignimbrite Perez), 2 — Pliocène, 3 — Miocène, 4 — failles, 5 — failles inverses, 6 — anticlinaux, 7 — synclinaux, 8 — site de mesures de plis, 9 — sites de mesures sur la faille de Chiriquiña.

Diagrammes : mêmes symboles que sur la Fig. 5. Le diagramme (Plt) regroupe les axes de plis (1H à 1M). Dans cette région, la direction moyenne du raccourcissement Z de la phase F5 est 52° N.

Structural sketch map from Curahuara region, northern Altiplano (pulse F5, Upper Pliocene).

Map: 1 — Sedimentary and volcanic (Perez Ignimbrite) deposits of plio-quaternary age; 2 — Pliocene; 3 — Miocene; 4 — faults; 5 — reverse faults; 6 — anticlinals; 7 — synclinals; 8 — analysed faulted sites; 9 — analysed sites along the Chiriquiña fault.

Stereonets: Same symbols as Fig. 5. The stereonet Plt regroups the fold axis (1H to 1M). In this region, the main Z shortening direction of pulse F5 is 52° E.

9,1 Ma (EVERNDEN *et al.*, 1966, 1977) et sur la Formation Turco (11,7 Ma, LAVENU *et al.*, 1989). La base des sédiments discordants a été datée entre 6,4 et 5,4 Ma (EVERNDEN *et al.*, 1966) et 7,6 Ma (LAVENU *et al.*, 1989). Cela place la phase de compression F4 dans le Miocène terminal vers 7-8 Ma (Fig. 2).

Les déformations plicatives de la phase F4 sont généralement de grands plis droits isopaques (MARTINEZ, 1980). Dans les sites analysés (sites 1 et 2, Fig. 4), les plis sont de dimension décamétrique à hectométrique, plus rarement kilométrique et sont souvent disposés en échelon; les pendages des flancs peuvent atteindre 85° à 90° . Dans la région de Curahuara (sites 1A à 1G, Fig. 5), le plissement

correspond à une direction de raccourcissement $25^{\circ} \pm 20^{\circ}$ N. Cette direction de raccourcissement est en accord avec un mouvement décrochant dextre sur la faille de San Andres (MARTINEZ, 1980) et sur les failles qui lui sont parallèles. Plus au nord, dans la région de San Andres (Fig. 4), les plis ont une direction NNW-SSE, plus méridienne que les directions observées ailleurs. Cela peut être dû soit à un changement local de la direction de raccourcissement le long de la faille de San Andres, comme cela est souvent observé le long des failles décrochantes compressives, soit au fait que ces plis, affectant les dépôts miocènes, ont été formés au cours de la phase du Pliocène terminal (F5). L'absence de sédiments pliocènes discordants sur

les plis de San Andres ne permet pas de choisir entre ces deux hypothèses. Toutefois, en dehors du voisinage de la faille de San Andres, dans des régions où le Miocène plissé est recouvert en discordance par le Pliocène, la cartographie des grandes structures miocènes montre un plissement résultant d'un raccourcissement proche de 40° N ; c'est le cas dans la région de Chuquichambi (Fig. 3) et d'Abaroa (site 2, Fig. 4).

La tectonique en compression d'âge pliocène supérieur à quaternaire ancien (phase F5)

Les plissements qui affectent les terrains pliocènes ont une répartition spatiale semblable à celle des plissements miocènes.

LE PLISSEMENT PLIOCÈNE DE LA RÉGION DE CURAHUARA

Dans cette région (Fig. 6), le Pliocène, plissé et affecté par des failles inverses, comporte à la base un niveau de tuf gris dont l'âge se situe vers 5,5 Ma (EVERNDEN *et al.*, 1966, 1977). Il est recouvert en discordance par l'unité ignimbritique Perez (Fig. 3). Celle-ci a été datée à 2,2 ou 3 Ma (EVERNDEN *et al.*, 1966) à Charaña, situé à 100 km au nord-ouest de Curahuara. À 20 km à l'ouest de Curahuara, près de Tirata (Fig. 4), il existe au moins deux unités

ignimbritiques superposées ; l'unité inférieure est datée à 3,3 Ma (LAVENU *et al.*, 1989) et la supérieure à 2,8 Ma (MARSHALL *et al.*, 1991). Malheureusement, comme l'unité inférieure repose dans cette région sur du Pliocène non plissé, l'âge du plissement n'est pas encore précisément établi.

Les plis isopaques, à grand rayon de courbure, de dimension hectométrique à kilométrique (Fig. 6) correspondent à une direction de raccourcissement 52° ± 20° N un peu différente de la direction moyenne de raccourcissement 85° ± 10° N reconnue dans l'Altiplano: Près des grandes failles inverses de direction 130° N à 140° N, ces plis ont des flancs plus redressés et sont parfois déversés. La direction de raccourcissement implique un mouvement inverse ou inverse dextre sur la faille de San Andres au cours de cette période.

Près de Chiriquiña (site 1N, Fig. 6), le Pliocène, discordant sur le Miocène, est lui-même plissé en synclinal (photo 1 et coupe, Fig. 7). Le plissement résulte d'un raccourcissement de direction proche de 45° ± 05° N (diagramme B, Fig. 7). La cinématique de la faille inverse plurikilométrique de Chiriquiña (points a, b et c, Fig. 7) résulte d'une compression σ_1 de direction 37° N (diagramme A, Fig. 7), compatible avec la direction du plissement. Par contre, les failles inverses qui coupent le pli ont une cinématique correspondant à un raccourcissement proche de N-S (diagramme C, Fig. 7). Cette cinématique est en accord avec la cinématique des failles

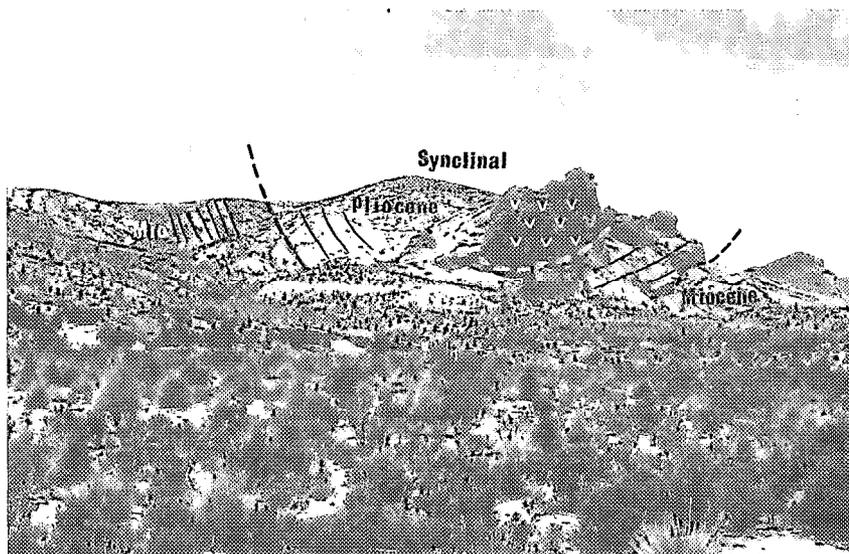


PHOTO 1. — Pli synclinal dû à la compression E-W (F5) affectant les dépôts pléistocènes de l'Estancia Chiriquiña (site 1N). Le cœur du synclinal est constitué par la Toba 76 (voir Fig. 7).
 Synclinal fold induced by the compression E-W (F5) of the pleistocene deposits of the Estancia Chiriquiña (site 1N). The Toba 76 (see Fig. 7) represents the center of the synclinal.

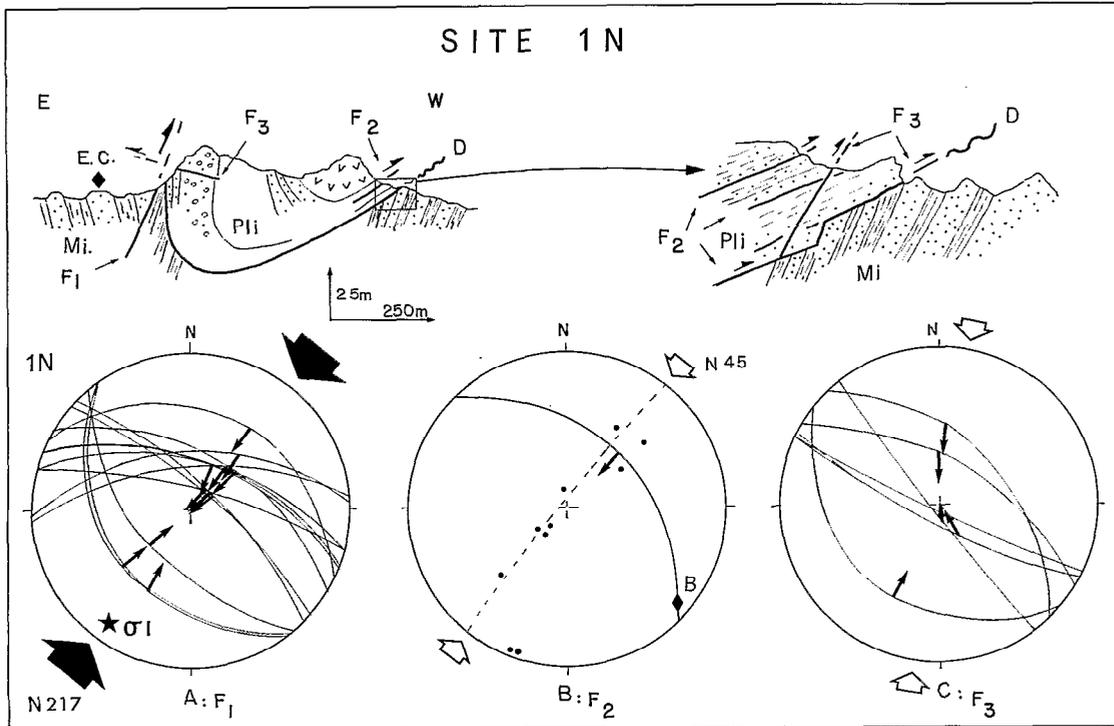


Fig. 7. — Interprétation du site de Chiriquiña (site 1N, points a, b et c de la Fig. 6).

La coupe montre la discordance (D) du Pliocène plissé (Pli) sur le Miocène (Mi). A : la microfracturation (F1) des sédiments pliocènes associée au plissement montre une direction de compression $\sigma_1 = N$; B : La direction axiale (B) du pli indique un raccourcissement $45^\circ N$; des glissements banc sur banc (failles F2) accompagnent ce plissement ; C : Une deuxième génération de failles inverses (F3) recoupant le pli et les failles F2 indique un raccourcissement de direction N-S.

Cross section and analysis of the faulted Chiriquiña site (site 1N, point a, b and c of the Fig. 6).

Cross section shows the unconformity (D) between the pliocene (Pli) and the miocene (Mi) formations. A: the microfaulting (F1) of the pliocene sediments associated with the folding shows a trending compression σ_1 of $N207^\circ E$. B: The folding axial direction (B) indicates a $N45^\circ E$ trending shortening; bedding-plane slip (F2) occur during the folding. C: a secondary generation of reverse faults (F3), cutting the fold and F2 faults indicates a N-S trending shortening.

inverses de direction E-W à NW-SE qui affectent l'ignimbrite Perez à Wiscoko (Fig. 6) et Tirata (Fig. 4). Ainsi le plissement et les failles inverses résultant d'un raccourcissement NE-SW sont postérieurs aux formations pliocènes (5,5 Ma) et antérieurs aux dépôts de l'ignimbrite Perez. Par contre, le mouvement sur les failles inverses à faible pendage résultant d'un raccourcissement N-S est, ici, postérieur au plissement.

LES FAILLES INVERSES AFFECTANT LE QUATERNAIRE ANCIEN DANS LA RÉGION DE CHARAÑA-ABAROA

Dans cette région (Fig. 8), l'ignimbrite Perez repose sur les andésites de la Formation Cerke (5,7 Ma), et

l'ensemble repose en discordance sur le Miocène. L'ignimbrite est surmontée par des dépôts lacustres d'âge pléistocène ancien (HOFFSTETTER et BRANISA in BLANCO, 1980). Dans la vallée de Markanasa (site 17, Fig. 8), l'ignimbrite Perez est coupée par des failles inverses (a et b, Fig. 8 ; photo 2) qui n'affectent pas le Pléistocène susjacent. Ces failles ont une direction E-W et un pendage de 25° à 30° nord. Les axes b des lenticulations situées sous le plan de faille indiquent un vecteur glissement d'azimut $25^\circ N$ compatible avec le décalage inverse senestre d'une fente observée en surface (point b, Fig. 8). Ces failles ont une cinématique en accord avec celle des failles inverses qui recoupent les plis d'âge pliocène dans la région de Curahuara.

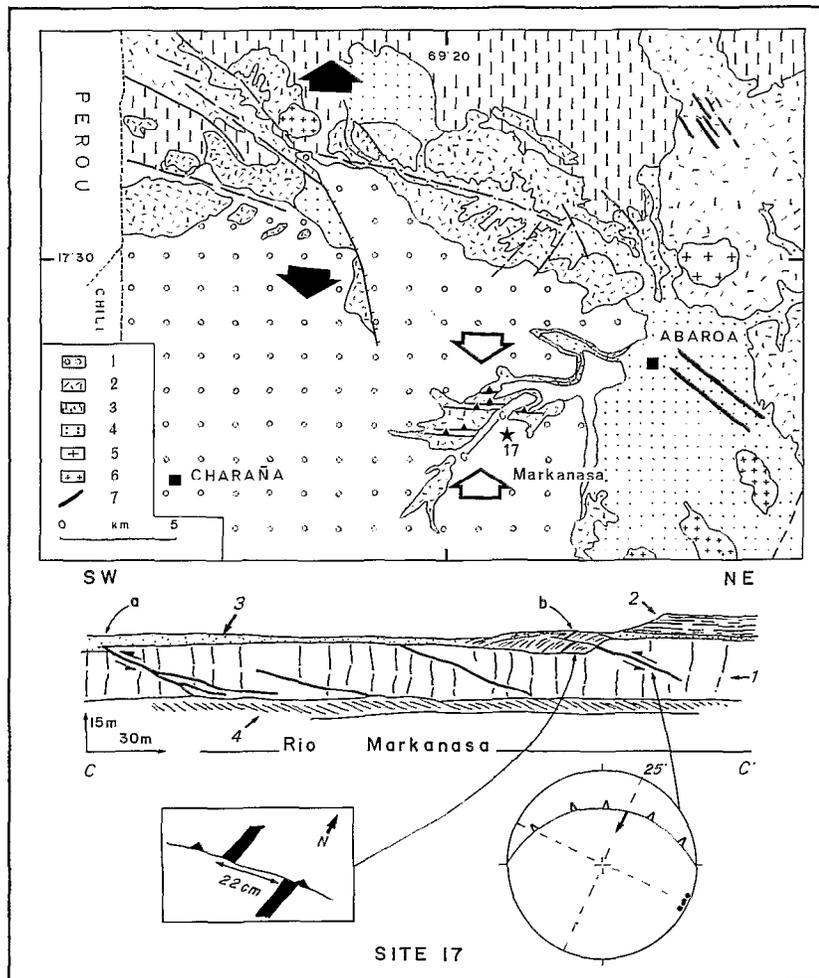


Fig. 8. — Failles inverses affectant l'ignimbrite Perez dans le bassin de Charaña (Cordillère occidentale).
 Carte : 1 — Formation Charaña d'âge pléistocène, ignimbrite Perez (3,3 Ma), 3 — Formation volcanique Cerke (5,7 Ma) ; Formation Mauri (Oligo-Miocène), 5 — intrusif quaternaire, 6 — intrusif miocène, 7 — dykes miocènes. Les flèches convergentes représentent la direction de raccourcissement approximativement N-S des failles inverses affectant le Quaternaire ancien. Les flèches divergentes indiquent la direction N-S de l'extension quaternaire le long des failles du Rio Mauri.
 Coupe (d'après photo) : 1 — Formation Perez, 2 — Formation Charaña, 3 — Quaternaire récent, 4 — terrasses actuelles ; a et b — scarplets de failles inverses visibles dans la morphologie. Le cartouche montre la composante décrochante senestre de la faille inverse. Le diagramme indique les axes b des lenticulations (points) associées à la faille inverse portant des stries (flèches).
Perez ignimbrite affected by reverse faults in the Charaña Basin (Western Cordillera).
Map: 1 — Charaña Formation of pleistocene age; 2 — Perez ignimbrite (3.3 Ma); 3 — Cerke volcanic Formation; 4 — Oligocene-Miocene Mauri Formation; 5 — Quaternary intrusive rocks; 6 — Miocene intrusive rocks; 7 — Miocene dykes. Convergent arrows indicate the N-S shortening direction along the Quaternary reverse faults. Divergent arrows indicate the N-S Quaternary tensional direction along the Rio Mauri faults.
Cross section (after photo): 1 — Perez Formation; 2 — Charaña Formation; 3 — Upper Quaternary; 4 — Recent terraces; a and b — reverse fault scarplets visible in landscape. Box shows the left-lateral component of reverse fault. Stereonet indicates b axis of lenticulations (points) associated with striated (arrows) reverse fault.



PHOTO 2. — Failles inverses dans l'ignimbrite Perez (site 17) dues à la compression N-S du Pléistocène ancien (voir Fig. 8).
Reverse faults in the Perez ignimbrite (site 17) resulting of the late Pleistocene N-S compression (see Fig. 8).

LA RÉGION DE LA PAZ

À La Paz (Fig. 9), le Pliocène daté entre 5,5 et 2,8 Ma est plissé et recouvert en discordance par des formations glaciaires et fluvio-glaciaires attribuées au Pliocène supérieur et au Quaternaire (DOBROVOLNY, 1962 ; SERVANT, 1977 ; CLAPPERTON, 1979 ; LAVENU *et al.*, 1989). À Achumani et à Llojeta (Fig. 9), comme à l'ouest de La Paz où ils ont été mis en évidence par prospection géophysique (FERRANDES *et al.*, 1977), les plis ont une direction voisine de N-S (diagramme 5D, Fig. 10). Leur direction axiale tend à devenir parallèle aux grandes failles d'Amachuma et de Kenko au voisinage de celles-ci, failles qui affectent, en surface, le Quaternaire. Les rapports géométriques des directions axiales des plis et des failles impliquent que celles-ci ont eu une composante décrochante senestre pendant le plissement. Par ailleurs, les failles de direction 110° N associées aux failles majeures de direction 125° N de Kenko et d'Amachuma correspondent à des structures de type Riedel (LAVENU, 1977) associées aux failles majeures et ont, comme celles-ci, une composante décrochante senestre. L'ensemble de ces structures indique un

raccourcissement proche de E-W durant le Pliocène supérieur à terminal.

Dans la même région (sites 5A et 5C, Fig. 9), les failles qui affectent les formations pliocènes montrent deux cinématiques, l'une en failles inverses ou décrochantes inverses, l'autre en failles normales. Par contre, les failles qui affectent le Quaternaire de ces mêmes sites montrent toujours une cinématique en failles normales résultant d'un allongement à peu près N-S (voir *infra*).

On peut donc ainsi clairement séparer la famille de stries inverses postérieure aux formations du Pliocène supérieur et antérieure au Quaternaire. L'analyse des vecteurs glissement sur les failles inverses a été réalisée en utilisant l'algorithme d'inversion de Carey (CAREY et BRUNIER, 1974 ; CAREY, 1979). Le calcul montre que la cinématique de ces failles est expliquée par une direction principale de la contrainte maximum (σ_1) voisine de E-W (diagrammes 5A1 et 5C, Fig. 10 et Tabl. I). Cependant, au site 5A, la cinématique d'un certain nombre de failles inverses n'est pas compatible avec cette compression E-W ; elle résulte d'un raccourcissement voisin de N-S (diagramme 5A2, Fig. 10).

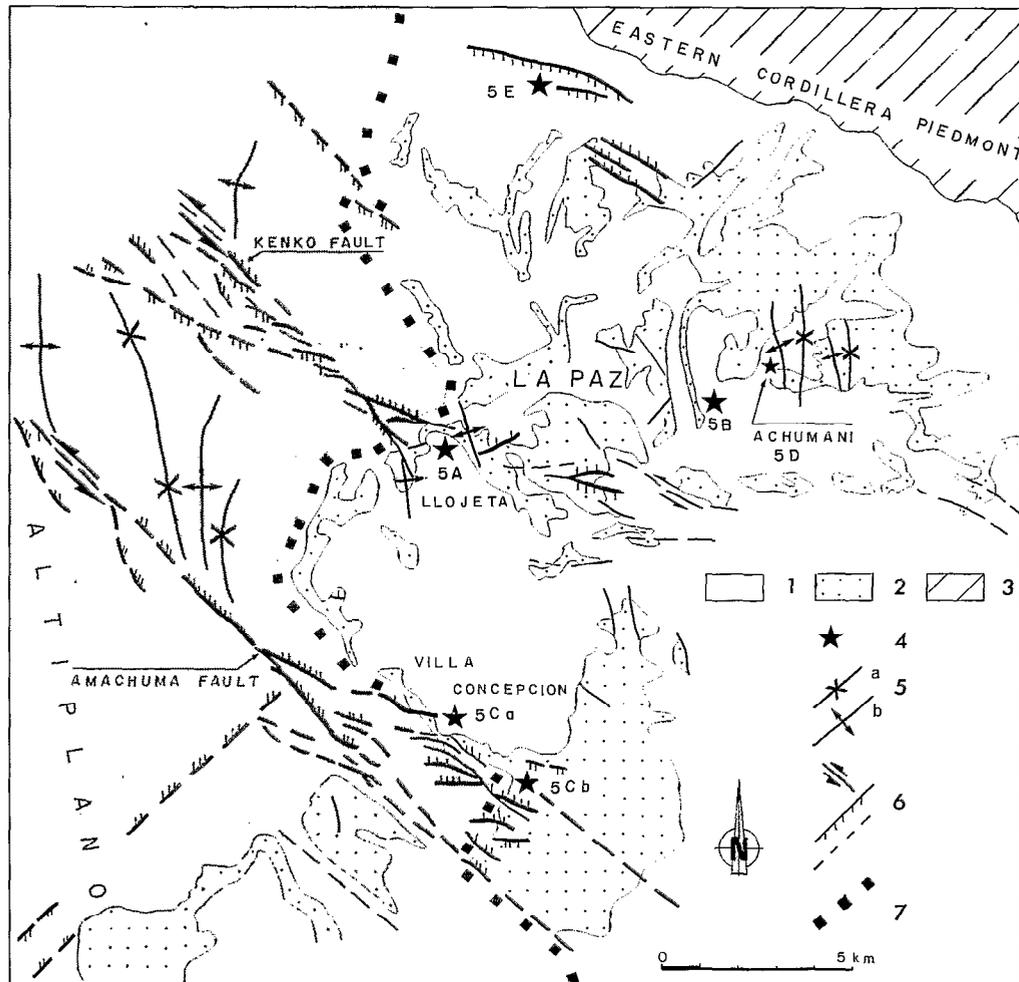


Fig. 9. — Schéma structural de la région de La Paz.

1 : Quaternaire, 2 : Pliocène, 3 : formations anté-pliocènes, 4 : sites de mesures (5A : Llojeta, 5B : Irpavi, 5C : Villa Concepcion, 5D : Achumani, 5E : Quebrada Minasa), 5 : synclinaux (a) et anticlinaux (b), 6 : failles, les flèches indiquent le sens du décrochement, les barbelures indiquent le bloc abaissé des failles normales et les lignes discontinues les failles mises en évidence par prospection géophysique, 7 : bord morphologique de l'Altiplano (en grisé, surface de l'Altiplano).

Schematic structural map of the La Paz region.

1 — Quaternary rocks; 2 — Pliocene sediments; 3 — Ante-Pliocene formations; 4 — analyzed sites (5A : Llojeta; 5C : Villa Concepcion; 5D : Achumani; 5E : Quebrada minasa); 5 — anticlinal (a), synclinal (b); 6 — faults; arrow indicates direction of lateral movement; bars indicate geophysical prospecting deduced faults; 7 — morphological edge of Altiplano (grey: Altiplano surface).

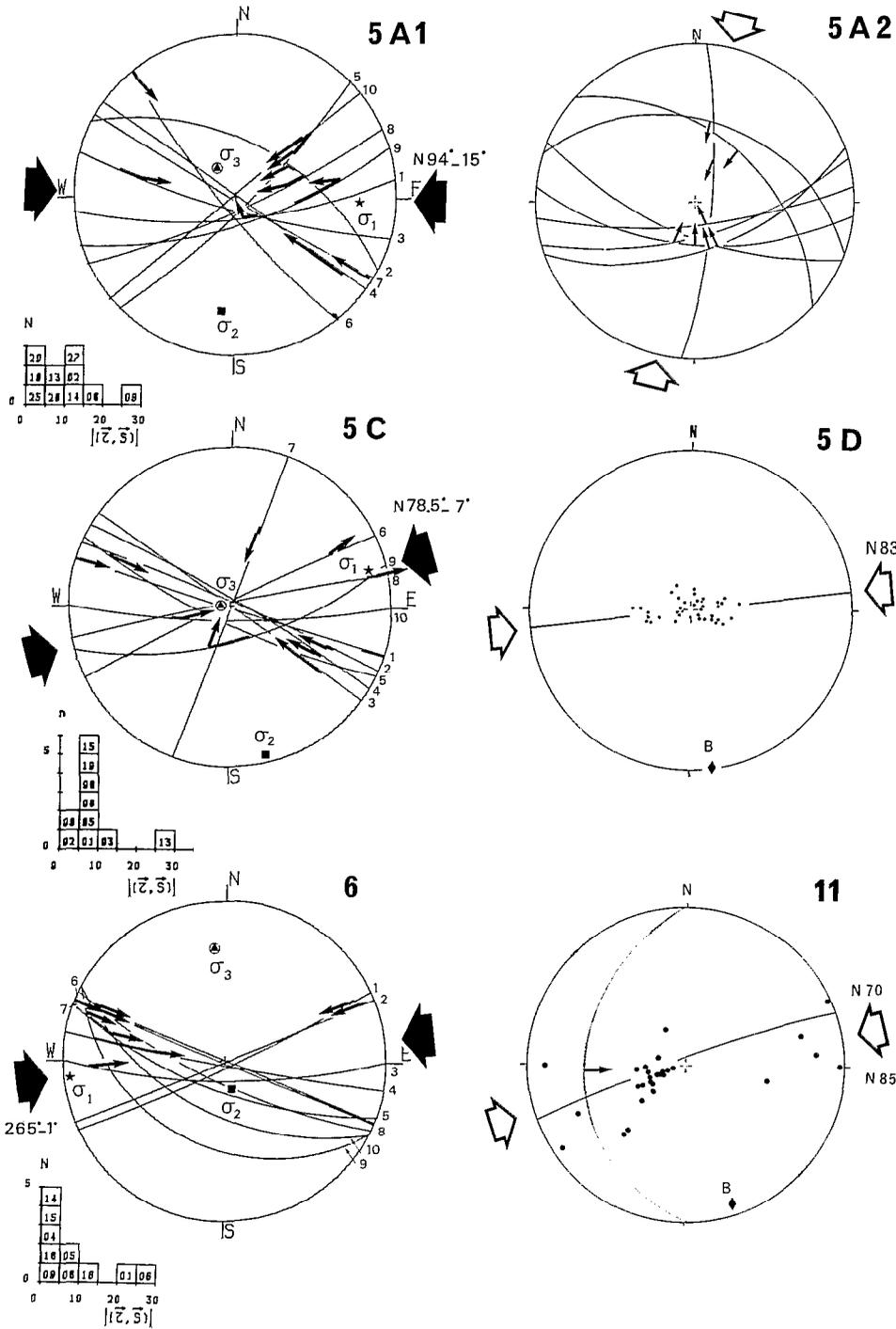


Fig. 10. — Données des plissements et données de failles inverses utilisées pour calculer les directions de compression de la phase F4 dans l'Altiplano Nord.

Pour les plis, les symboles sont les mêmes que sur la figure 5. Les flèches liées aux traces de failles correspondent aux stries mesurées (Wulff, hémisphère inférieur). Les petits segments sur les traces de failles et les histogrammes indiquent la déviation entre le vecteur S mesuré et le vecteur t calculé. Les numéros des données autour du canevas correspondent aux numéros portés sur les histogrammes. Les grosses flèches noires donnent les azimuts des directions principales de contrainte σ_1 calculées. Elles sont proches de E-W. Les paramètres des tenseurs calculés sont figurés sur le tableau 1. La direction de raccourcissement N-S du site 5A2 est estimée graphiquement et indiquée par une flèche blanche. Les sites sont localisés sur la figure 1.

Data folding and data reverse faulting used to computed shortening σ_1 direction of pulse F4 from northern Altiplano. Folds, same symbol as Fig. 5. Arrows linked to fault traces correspond to the measured slip vector (Wulff stereonet, lower hemisphere). Thick segments on fault traces and histograms show deviations between measured S and predicted slip vector for each fault plane. Small numbers outside the stereonet refer to fault data. Large arrows give azimuth of the maximum σ_1 computed principal stress directions. They strike nearly E-W. parameters of computed tensors in Table 1. N-S shortening direction of site 5A2 is graphically estimated (white arrow). Location of sites in Fig. 1.

LA RÉGION DE AYO AYO

Au sud de Ayo Ayo (site 6, Fig. 11), comme dans la région de La Paz, des formations pléistocènes datées reposent en légère discordance sur du Pliocène daté par des fossiles (HOFFSTETTER *et al.*, 1971) et par radiochronologie (anté-2,8 Ma, LAVENU *et al.*, 1989).

Dans les formations pléistocènes, seules existent les failles normales. L'inversion des vecteurs glissement des seules failles inverses affectant les formations pliocènes montre que celles-ci résultent d'une compression de direction 85° N (diagramme 6, Fig. 10, Tabl. I). Seules deux failles sont incompatibles avec cette solution et sont en accord avec un raccourcissement N-S.

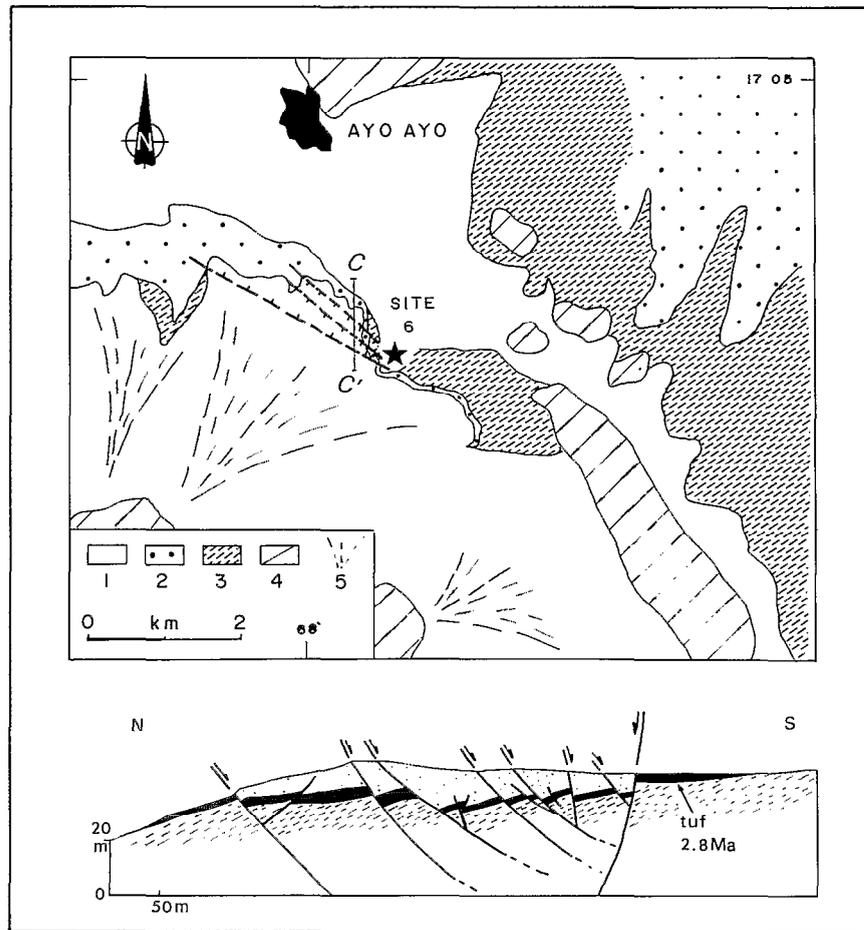


Fig. 11. — Schéma structural et coupe de la région d'Ayo Ayo.

1 : Quaternaire, 2 : Pléistocène daté, 3 : Pliocène daté, 4 : Paléozoïque, 5 : glacis quaternaires.
Coupe CC' : la partie supérieure est dessinée d'après photo. Tirets : Pliocène ; noir : tuf daté à 2,8 Ma (LAVENU *et al.*, 1989) ; points : Pléistocène. La partie inférieure de la coupe est une interprétation de la géométrie possible en profondeur des failles observées en surface.

Schematic structural map and cross section of Ayo Ayo zone.

1 — Quaternary sediments; 2 — rocks of pleistocene age; 3 — Pliocene deposits; 4 — Paleozoic rocks; 5 — Quaternary pediments.
Cross section CC': upper part is drawn after photo; dashes: Pliocene deposits; black: tuff (2.8 Ma) (LAVENU *et al.*, 1989); points: Pleistocene deposits. The lower part is the interpretation of deep geometry from observed superior faults.

TABLEAU I
 Paramètres des tenseurs de contraintes déviatoriques
 calculés à partir des données des vecteurs glissement des failles inverses et décrochantes
 inverses de l'Altiplano et de la Cordillère orientale
*Tensor's parameters of stress computed from datas of sliding vectors of reverse
 and strike slip reverse faults in Altiplano and the Eastern Cordillera*

| Site | N | Latitude S | Longitude W | Directions principales des contraintes | | | | | | R |
|------|----|---------------|----------------|--|-------|------------|-------|------------|-------|------|
| | | | | σ_1 | | σ_2 | | σ_3 | | |
| | | | | Az. | Plon. | Az. | Plon. | Az. | Plon. | |
| 1N | 13 | 17°49' | 68°22' | 217 | 06 | 309 | 06 | 86 | 81 | 0,17 |
| 5A1 | 10 | 16°32' | 68°08' | 94 | 15 | 189 | 19 | 329 | 65 | 0,73 |
| 5C | 10 | 16°36' | 68°08' | 78 | 07 | 169 | 03 | 280 | 82 | 0,43 |
| 6 | 10 | 17°07' | 68°00' | 265 | 01 | 172 | 70 | 356 | 20 | 0,83 |
| 8A1 | 23 | 17°26' | 65°58' | 81 | 01 | 351 | 09 | 176 | 81 | 0,87 |
| 10B | 10 | 19°03' | 65°14' | 270 | 02 | 000 | 02 | 138 | 87 | 0,80 |
| 18A | 7 | 21°32' | 64°42' | 85 | 04 | 329 | 82 | 176 | 07 | 0,55 |

Les sites sont localisés sur la figure 1. N est le nombre de failles striées utilisées pour calculer les solutions. Les azimuts (Az.) sont mesurés dans le sens horaire à partir du nord. Le plongement (Plon.) est dans la direction de l'azimut mesuré. $R = \sigma_2' - \sigma_1'/\sigma_3' - \sigma_1'$ varie entre 0 quand $\sigma_2' = \sigma_1'$ et 1 quand $\sigma_2' = \sigma_3'$.

Sites are located on the fig. 1. N is the number of striated faults used for the solutions. Azimuths (Az.) are clockwise measured from the north. The plunge (Plon.) is in the same direction as the measured azimuth. $R = \sigma_2' - \sigma_1'/\sigma_3' - \sigma_1'$ varies between 0 when $\sigma_2' = \sigma_1'$ and 1 when $\sigma_2' = \sigma_3'$.

LA RÉGION DE CULLURI

Dans cette région (site 11, Fig. 12), les formations miocènes chevauchent, par une faille inverse de direction N-S, à pendage ouest, des formations d'âge pliocène (LAVENU, 1984b). Ces dernières sont plissées et forment un synclinal déversé, lui-même affecté par une faille inverse. L'axe du pli est compatible avec un raccourcissement de direction moyenne 80° N (site 11, Fig. 10).

Quelques plans de failles résultent aussi d'un raccourcissement N-S ; mais il n'a pas été possible d'établir une chronologie relative de ces deux cinématiques.

En conclusion, sur l'Altiplano bolivien, on peut mettre en évidence l'existence de structures compressives dues à deux directions de raccourcissement. Les unes affectent des dépôts d'âge pliocène supérieur et correspondent à des plissements et des failles inverses résultant d'un raccourcissement de direction 45° N à 90° N ; ce sont les structures majeures. Les autres affectent des dépôts d'âge pliocène supérieur à quaternaire ancien et correspondent à des failles inverses résultant d'une com-

pression N-S. Cependant, une chronologie entre ces deux familles de structures n'est pas sûrement établie.

Dans d'autres régions, dans le bassin de Cuzco au Pérou par exemple (CABRERA *et al.*, 1989), les deux directions de raccourcissement N-S et E-W appartiennent à un même événement tectonique daté du Pléistocène inférieur et il ne semble pas y avoir deux phases de compression distinctes se succédant dans le temps et correspondant à deux cinématiques différentes (*cf.* SÉBRIER *et al.*, 1988b ; MERCIER et CAREY-GAILHARDIS, 1989).

LES RÉGIMES TECTONIQUES EN EXTENSION DANS LE NORD DE L'ALTIPLANO BOLIVIEN AU PLIOCÈNE ET AU QUATERNAIRE

Ces mouvements tectoniques extensifs sont postérieurs à 7-8 Ma (phase F4). Ils ont été analysés dans les formations d'âge miocène à quaternaire, à l'est et à l'ouest de l'Altiplano, essentiellement sur les bordures des Cordillères orientale et occidentale.

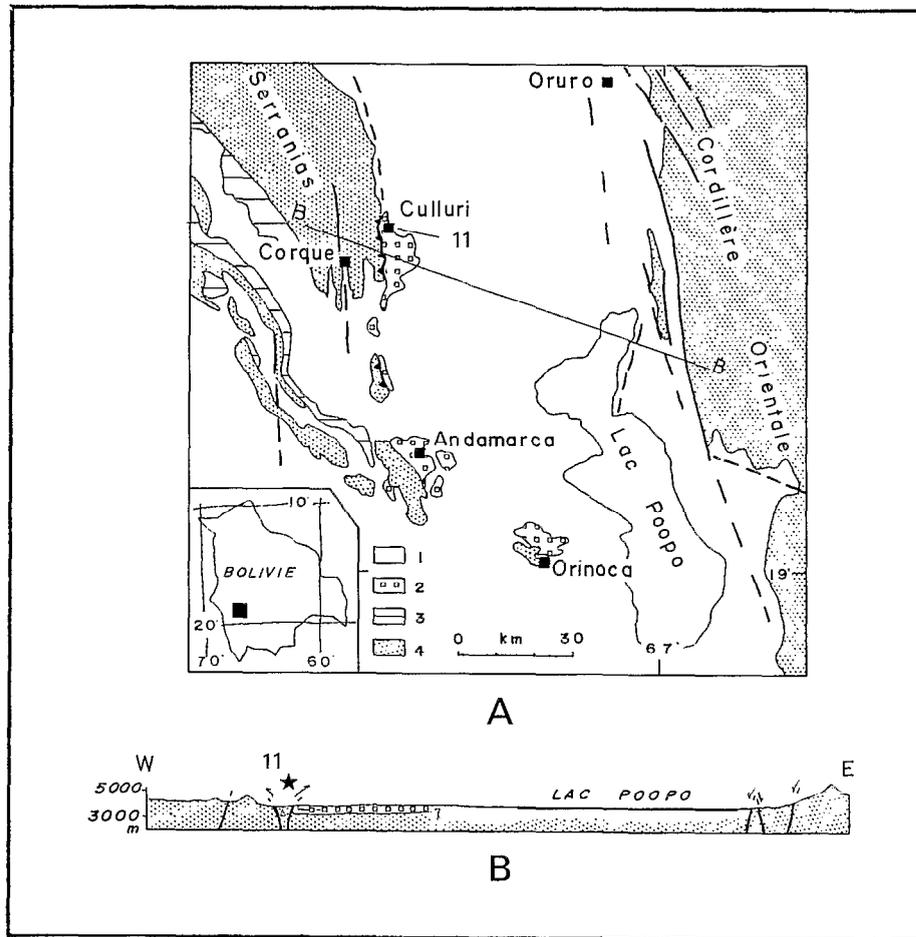


Fig. 12. — Les déformations en compression d'âge pliocène terminal (phase F5) dans la région de Culluri (Altiplano central).
 A — 1 : Quaternaire indifférencié, 2 : Formation Remedios (Pliocène), 3 : Formation Pomata (Pliocène), 4 : terrains anté-pliocènes.
 B — Les symboles sont ceux de la carte. La formation Remedios est plissée (site 11, Fig. 10).

Upper-pleistocene compressional deformations (pulse F5) near Culluri (Central Altiplano).

A — 1: Undifferentiated quaternary deposits; 2: Pliocene Remedios Formation; 3: Pliocene Pomata Formation; 4: Pre-pleistocene sediments.

B — Same symbols as in the map. The Remedios Formation is folded (site 11, Fig. 10).

Le graben de la région de Tirata

Dans cette région (site 7A, Fig. 13), de grandes failles plurikilométriques, de direction NNE-SSW affectent les formations d'âge miocène, pliocène et quaternaire qui, ici, sont concordantes. Elles limitent un graben double. La coupe de ce graben (Fig. 13 et photo 3) montre que l'essentiel du déplacement vertical lié au mouvement en faille normale est acquis avant le dépôt de l'ignimbrite Perez, bien que ce dernier niveau soit aussi décalé par les failles (site 7A, Fig. 13). Dans les sédiments miocènes et

pliocènes, les plans de failles montrent aussi des stries indiquant un mouvement postérieur en faille inverse. Le premier mouvement en faille normale (1) résulte d'une extension voisine de E-W (diagramme 7A, Fig. 16), et le second mouvement en faille inverse (2a), d'une compression E-W. Mais l'ignimbrite Perez aussi est affectée (site 7B, Fig. 13) par des failles inverses (2b) résultant d'un raccourcissement proche de N-S, compatible avec le raccourcissement N-S observé à Chiriquiña et à Markanasa (diagramme C, Fig. 7 et Fig. 8). L'épisode d'extension E-W (1), antérieur aux épisodes

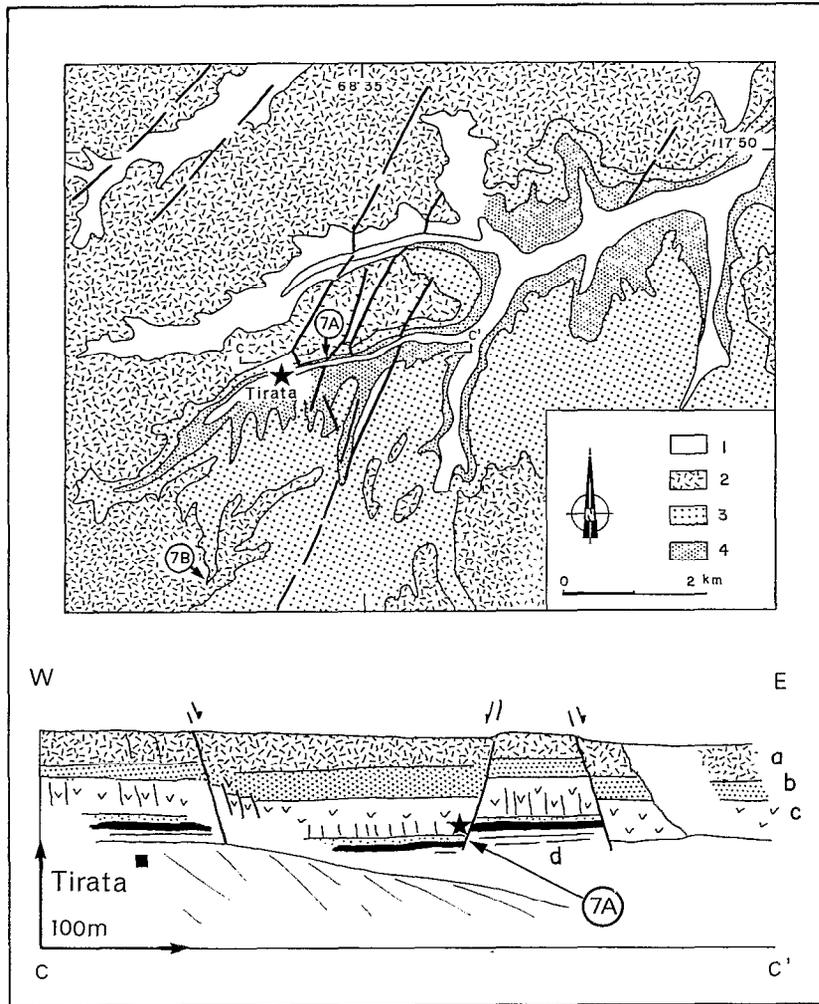


Fig. 13. — Les déformations plio-quaternaires du site de Tirata (bordure occidentale de l'Altiplano).

Carte — 1 : Quaternaire alluvial, 2 : Ignimbrite Perez, 3 : Pliocène, 4 : Miocène. Des failles NNE-SSW affectent l'ensemble des dépôts néogènes.

Coupe — a : ignimbrite Perez, b : sédiments pliocènes, c : tuf appelé « Toba 76 » de la base du Pliocène, d : sédiments miocènes. Sur la bordure ouest du graben, les petites failles normales affectant le Pliocène sont synsédimentaires.

Plio-Quaternary deformations in the Tirata site (Western Altiplano).

Map : 1 — Quaternary alluvium ; 2 — Perez ignimbrite ; 3 — Pliocene sediments ; 4 — Miocene deposits. NNE-SSW faults affect the pliocene sediments.

Cross section: a — Perez ignimbrite; b — Pliocene sediments; c — "Toba 76", tuff of early Pliocene; d — Miocene sediments. On the western edge of the graben, small synsedimentary normal faults affect the Pliocene sediments.

de compression (2a, 2b) d'âge pliocène supérieur à terminal, est donc d'âge pliocène. Il n'a pas été possible de déterminer localement la cinématique des failles normales tardives (3) qui effondrent cette ignimbrite.

Dans la région d'Achiri (Fig. 4), à 80 km au nord-ouest de Tirata, l'ignimbrite Perez et le piémont

subhorizontal sur lequel elle repose sont recoupés par la faille de San Andres. La base de l'ignimbrite se trouve à 4 120 m d'altitude à l'ouest de la faille et à 3 980 m à l'est. La faille de San Andres a donc eu un mouvement probablement en faille à composante normale tardif (3), postérieur à l'ignimbrite Perez dont le rejet vertical atteint 140 m.

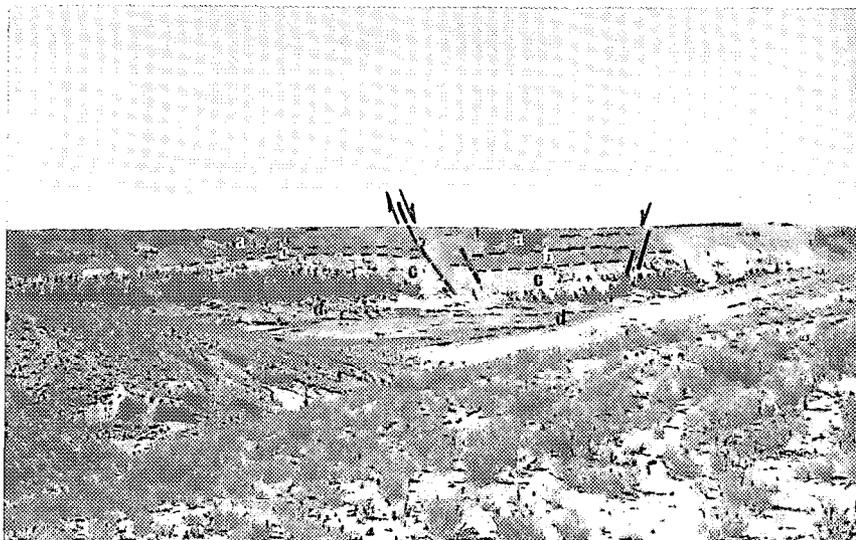


PHOTO 3. — Graben plio-quaternaire de Tirata (site 7) (voir coupe Fig. 13).

Plio-quaternary graben of Tirata (site 7) (see cross section Fig. 13).



PHOTO 4. — Faille normale de Kenko, La Paz (site 5A), affectant les dépôts quaternaires de l'Altiplano (voir Fig. 14).

Kenko normal fault, La Paz (site A), in the quaternary deposits of Altiplano (see Fig. 14).

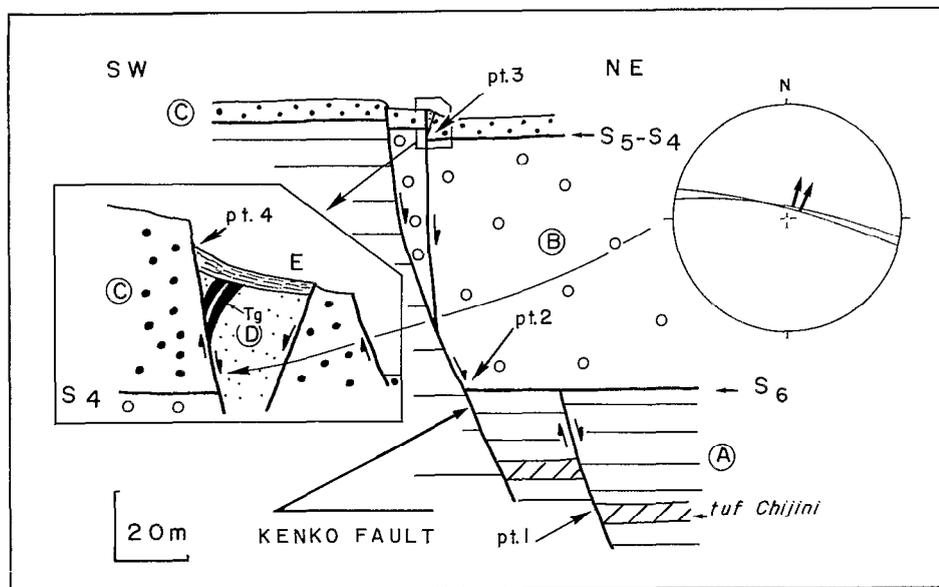


Fig. 14. — Coupe de la faille normale de Kenko (site 5A, Fig. 9, bassin de La Paz).

A : sédiments pliocènes, B : Formation Purapurani datée à 1,6 Ma reposant sur la surface d'ablation S6, C : gravas de l'Altiplano déposées sur la surface d'ablation polygénique (S5-S4), D : éboulis de pente dans lesquels on observe des fentes d'extension (tg). L'analyse de la déformation quaternaire indique une extension de direction N-S (diagramme 5A, Fig. 17).

Cross section of the Kenko normal fault (site 5A, Fig. 9, Basin of La Paz).

A — Pliocene sediments; B — Purapurani Formation (1.6 Ma) overlying the S6 pediments; C — Altiplano gravels deposited on the S5/S4 polygenic pediments; D — Slope debris with tension gap (tg). The quaternary deformation indicates a N-S trending extension (stereonet 5A, Fig. 17).

Les failles normales de la région de La Paz

Dans le bassin de La Paz (Fig. 9), de nombreuses failles normales affectent les dépôts quaternaires de l'Altiplano. Sur la faille de Kenko (site 5A, Fig. 9 et photo 4) des mouvements successifs d'âge pliocène et quaternaire ont pu être distingués. Au nord-est de la faille principale (Fig. 14), le Pliocène daté est affecté par une faille normale recoupée par la surface d'ablation S6 recouverte par des dépôts quaternaires (point 1, Fig. 14). Son rejet est de quelques mètres ; sa cinématique n'est pas connue. Les niveaux quaternaires sont eux-mêmes affectés par des failles normales montrant des rejets successifs : la surface d'ablation S6 est décalée verticalement de plus de 80 m (point 2) et le glacis S₄-S₅ d'environ 1 m (point 3) ; la surface topographique montre un scarplet de quelques décimètres de haut (point 4).

L'étude sédimentologique de la bordure sud-est du bassin de La Paz (LAVENU, 1984a) confirme qu'il existe une extension pliocène synsédimentaire, antérieure au plissement pliocène supérieur. En effet, on constate que les cônes alluviaux alimentés

durant presque tout le Pliocène par les reliefs de la Cordillère orientale ont été progressivement recouverts par les faciès fluvio-lacustres du centre du bassin. Ce phénomène de superposition de faciès proximaux (cônes alluviaux) par des faciès distaux (lacustres) correspond à un élargissement vers l'est du bassin dans un régime tectonique en extension (PERRODON, 1971 ; DELFAUD, 1977). Cela est en accord avec l'épaisse accumulation (700 m) de formations fluvio-lacustres dans le bassin.

Sur le piémont de la Cordillère orientale, entre La Paz et le lac Titicaca, les failles normales majeures de direction NW-SE qui affectent les terrains quaternaires glaciaires et fluvio-glaciaires (Fig. 15) ont été actives durant tout le Quaternaire. L'ampleur des mouvements verticaux au pied de la Cordillère orientale est parfois importante. Dans le bassin de La Paz, le rejet quaternaire cumulé atteint une centaine de mètres à Llojeta (point 1, Fig. 15), 300 m dans la Quebrada Minasa (point 2), 200 m à l'est de Peñas (point 3) ainsi que sur la rive est du lac Titicaca (LAVENU, 1981a). Les failles ont un pendage soit vers l'est, soit vers l'ouest, mais les rejets les plus importants sont liés aux failles à pendage ouest.

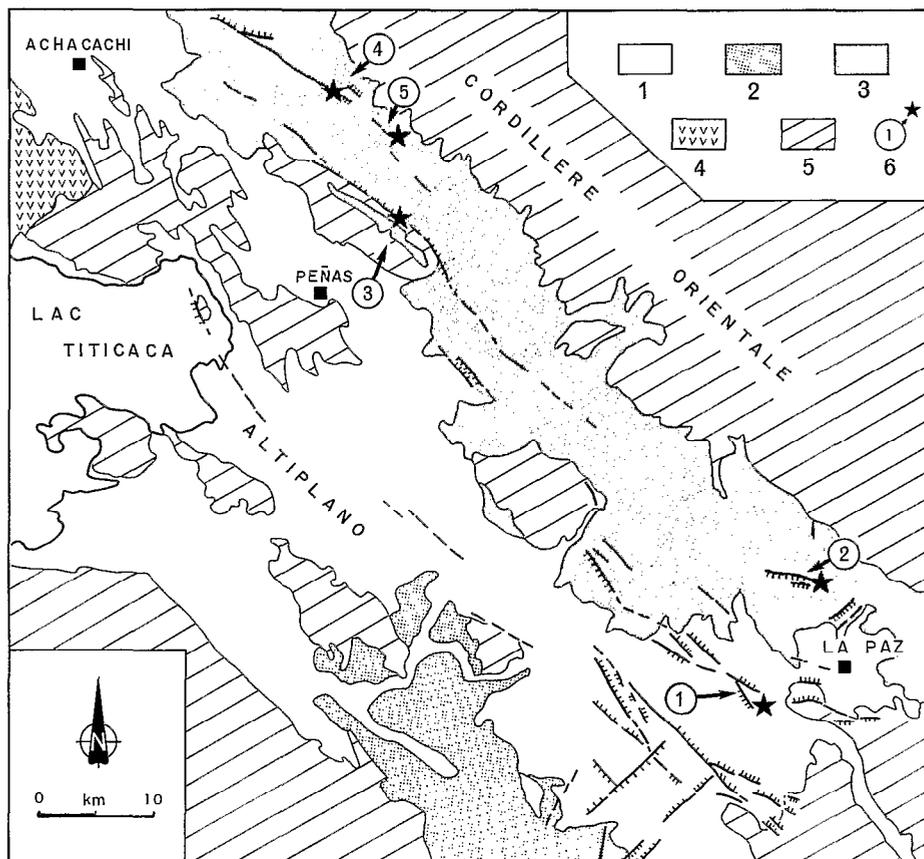


Fig. 15. — Schéma structural du piémont de la Cordillère orientale entre La Paz et le lac Titicaca (d'après LAVENU, 1981a).
 1 : Quaternaire récent, 2 : Formation Ulloma (« lacustre ballivian »), 3 : unités plio-quaternaires anciennes, glaciaires et interglaciaires, 4 : volcanisme anté-quaternaire, 5 : terrains sédimentaires anté-quaternaires.
 Le Quaternaire du piémont de la Cordillère orientale est affecté de nombreuses failles normales dont certaines sont actives. Chiffres cerclés — 1 : site 5A (Llojeta), 2 : site 5E (Quebrada Minasa), 3 : nord-est de Peñas, 4 et 5 : est d'Achacachi.
Schematic structural map of the eastern Cordillera piedmont between La Paz and the Lake Titicaca (after LAVENU, 1981 a).
 1 — Holocene; 2 — Ulloma Formation (Ballivian lacustrine deposits); 3 — Old plio-quaternary deposits of glacial and interglacial stages; 4 — Pre-quaternary volcanism; 5 — Pre-quaternary sediments.
 Numerous normal faults affect the Eastern Cordillera Piedmont. Some are active. Numbers in circle: 1 — site 5A (Llojeta), 2 — site 5E (Quebrada Minasa), 3 — NE of Peñas, 4 and 5 — east of Achacachi.

La cinématique des failles normales a été étudiée dans le bassin de La Paz (sites 5A, 5B, 5C, 5E, Fig. 16 et 17 ; Tabl. II). Les mesures des stries ont été faites dans les formations d'âge quaternaire et pliocène. Une séparation des données a été effectuée selon la compatibilité cinématique des failles entre elles. Cela conduit à séparer deux groupes de failles ; le premier résulte d'une extension voisine de N-S, le second d'une extension voisine de E-W. L'inversion des vecteurs glissement du premier groupe, qui contient toutes les failles affectant le Quaternaire, montre que cette cinématique résulte d'une extension (σ_3) de direction voisine de N-S (diagrammes 5A, 5B, 5C, 5E, Fig. 17). Le même

calcul a été fait avec les vecteurs glissement des failles non compatibles avec cette extension N-S ; il montre que celles-ci résultent d'une extension (σ_3) de direction 95° N (site 5B, Fig. 16). Là où le nombre de données est insuffisant (sites 5A, 5C, Fig. 16), l'analyse graphique montre aussi une direction d'allongement voisine de E-W.

Les formations d'âge quaternaire sont affectées seulement par l'extension de direction N-S, l'extension E-W est donc d'âge pliocène ; elle est à rapprocher de l'extension E-W observée sur les failles du graben de Tirata (site 7A, Fig. 16) et à Curahuara (site 1, Fig. 16).

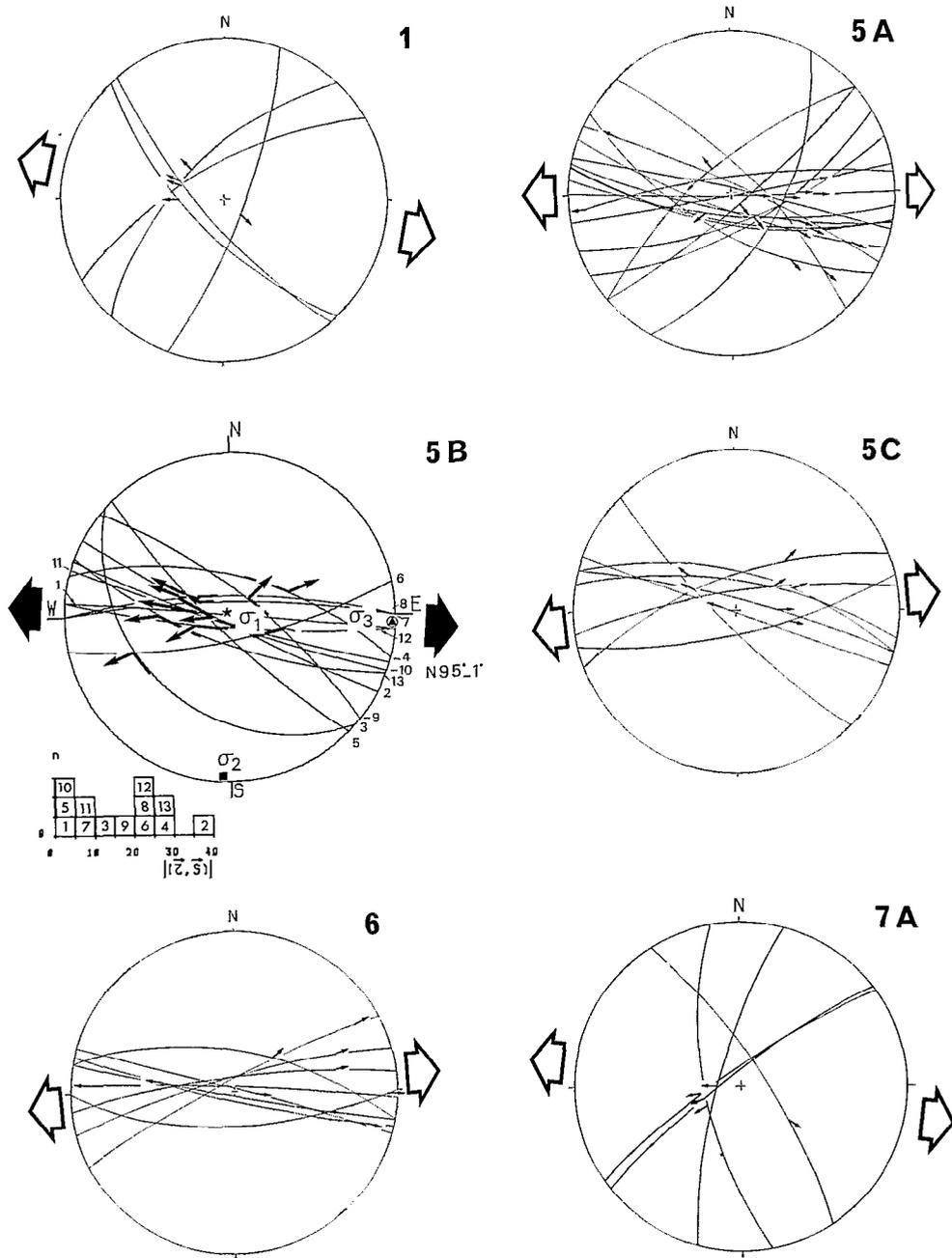


Fig. 16. — Données concernant des failles normales et décrochantes normales dans l'Altiplano oriental résultant de l'extension E-W d'âge pliocène. Mêmes symboles que sur la figure 10. Les paramètres des solutions figurent dans le tableau II. Les sites sont localisés sur les figures 1, 9 et 12.

Normal and strike-slip fault data of eastern Altiplano corresponding to the pliocene E-W trending extension. Same symbols as in the Fig. 10. The parameters of the solutions are in the Table II. Sites are located on the Fig. 1, 9 and 12.

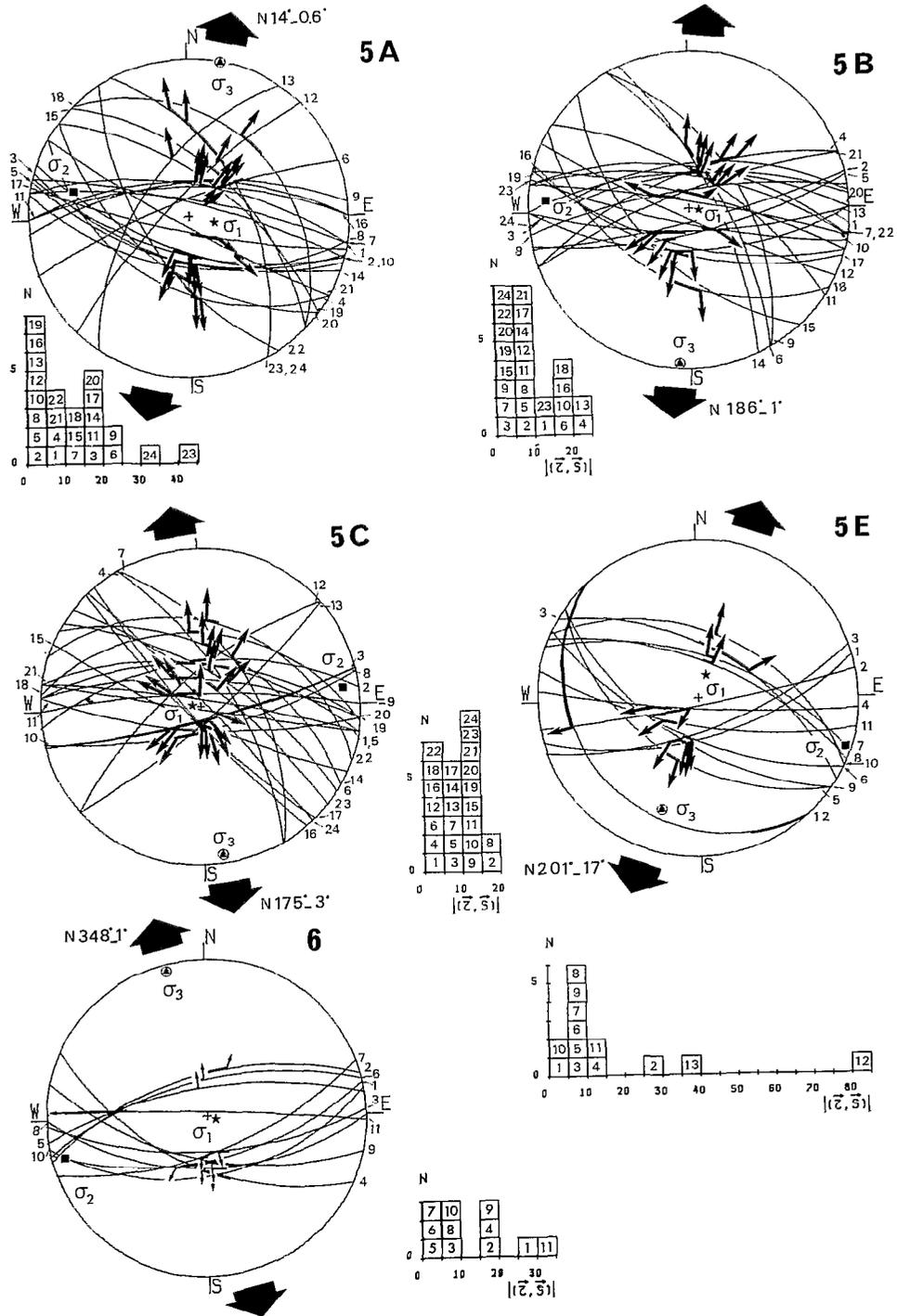


Fig. 17. -- Données concernant des failles normales dans l'Altiplano oriental résultant de l'extension N-S d'âge quaternaire. Mêmes symboles que sur la figure 10. Les paramètres des solutions figurent dans le tableau II. Les sites sont localisés sur les figures 1, 9 et 12.

Normal fault data of Eastern Altiplano linked to the quaternary N-S trending extension. Same symbols as in Fig. 10.

TABLEAU II

Paramètres des tenseurs de contraintes déviatoriques
calculés à partir des données des vecteurs glissement des failles normales
et décrochantes normales de l'Altiplano et de la Cordillère orientale
Même légende que le Tableau I

*Tensor's parameters of the stress computed from datas of the sliding-vectors of the normal
and strike slip normal faults in Altiplano and the Eastern Cordillera
Same legend as in Table I*

| Site | N | Latitude S | Longitude W | Directions principales des contraintes | | | | | | R |
|------|-----|---------------|----------------|--|-------|------------|-------|------------|-------|------|
| | | | | σ_1 | | σ_2 | | σ_3 | | |
| | | | | Az. | Plon. | Az. | Plon. | Az. | Plon. | |
| 5A | 24 | 16°32' | 68°08' | 104 | 72 | 284 | 18 | 14 | 00 | 0,57 |
| 5B | 13 | 16°31' | 68°05' | 294 | 88 | 186 | 05 | 95 | 01 | 0,78 |
| 5B | 24 | 16°31' | 68°05' | 89 | 84 | 277 | 06 | 186 | 01 | 0,71 |
| 5C | 24 | 16°36' | 68°08' | 288 | 83 | 85 | 06 | 175 | 03 | 0,94 |
| 5E | 11 | 16°27' | 65°07' | 19 | 73 | 111 | 01 | 201 | 17 | 0,46 |
| 6 | 11 | 17°07' | 68°00' | 100 | 86 | 258 | 04 | 348 | 01 | 0,50 |
| 8B3 | 11 | 17°23' | 66°01' | 212 | 79 | 310 | 01 | 41 | 10 | 0,83 |
| 18 | 104 | 21°32' | 64°42' | - | 90 | 291 | 03 | 201 | 04 | 0,94 |
| 18-1 | 26 | " | " | 66 | 84 | 306 | 03 | 216 | 05 | 0,92 |
| 18-2 | 26 | " | " | 74 | 84 | 283 | 05 | 193 | 03 | 0,90 |
| 18-3 | 26 | " | " | 63 | 84 | 287 | 04 | 197 | 04 | 0,96 |
| 18-4 | 26 | " | " | 67 | 88 | 283 | 02 | 193 | 01 | 0,96 |

La région d'Ayo Ayo

Le site d'Ayo Ayo (site 6, Fig. 11) est affecté par des failles normales à pendage sud, antithétiques d'une faille majeure à pendage nord (voir *supra*). Une séparation numérique a été effectuée sur l'ensemble des failles mesurées. Pour le premier groupe, la direction d'extension (σ_3) calculée est 348° N (diagramme 6, Fig. 17.; Tabl. II). Les failles non compatibles avec cette solution sont compatibles avec un allongement E-W (diagramme 6, Fig. 16), analogue à celui trouvé dans le bassin de La Paz.

En conclusion, l'ensemble des sites observés dans l'Altiplano montre l'existence de deux directions d'extension. L'extension E-W d'âge pliocène, est synsédimentaire dans le bassin de La Paz ; elle est antérieure à la compression d'âge pliocène supérieur. L'extension N-S affecte tous les niveaux quaternaires du piémont de la Cordillère orientale. Sur les bordures de l'Altiplano, à l'est comme à l'ouest, les rejets verticaux qui lui sont associés peuvent atteindre plusieurs centaines de mètres. Cette extension est postérieure à la compression d'âge pliocène supérieur qui n'a jamais été observée dans le Quaternaire moyen à récent du bassin de La Paz.

L'ÉTAT DE CONTRAINTE DANS LES BASSINS DE LA CORDILLÈRE ORIENTALE. COMPARAISON AVEC L'ALTIPLANO

La Cordillère orientale est aussi le siège d'une sédimentation néogène et quaternaire, localisée dans de petits bassins intramontagneux d'origine généralement tectonique. Les bassins de Ulla Ulla, de Tipuani (12, Fig. 1) et de Sucre (10, Fig. 1) sont contrôlés par des directions structurales 125° N. Le bassin de Cochabamba-Sacaba (8, Fig. 1) est lui contrôlé par une faille majeure de direction 100° N. Les bassins de San Isidro (9, Fig. 1) et de Tarija (18, Fig. 1) ont la direction N-S que prend la chaîne au sud de Sucre.

Le bassin de Cochabamba-Sacaba

Ce bassin situé au centre de la Cordillère orientale (Fig. 18) contient des dépôts sédimentaires faillés et plissés datés du Pliocène (MANCILLA, 1979), recouverts en discordance par des terrains fluvio-lacustres horizontaux d'âge quaternaire récent (LAVENU et BALLIVIAN, 1979). L'épaisseur des sédiments est estimée de 300 m (AHLFELD, 1972) à 900 m (MANCILLA, 1979). La direction moyenne

155° N des axes de plis affectant le Pliocène indique une direction de raccourcissement ENE-WSW (diagramme 8, Fig. 19). Des mesures de failles inverses effectuées dans le Pliocène, essentiellement à l'est du village de Sacaba, montrent que la cinématique d'un grand nombre d'entre elles résulte d'une compression σ_1 de direction 81° N (diagramme 8A1, Fig. 19 et Tabl. I). Toutefois, certaines stries ne sont pas compatibles avec une telle cinématique mais peuvent être en accord avec un raccourcissement de direction voisine de N-S (diagrammes 8A2 et 8A1, Fig. 19).

De petites terrasses ou des amorces de surfaces d'ablation s'étagent le long de la faille Tunari. Ces niveaux d'ablation y sont plus nombreux sur le bord nord du bassin, témoignant ainsi d'un fort

soulèvement et donc de l'activité de la faille au cours du Quaternaire. De nombreux cônes alluviaux très actifs recouvrent la trace de la faille et ne permettent pas d'observer le plan de faille. Les sédiments lacustres quaternaires très récents, discordants sur le Pliocène, ne montrent pas de traces claires de failles. Par contre, une microfracturation en failles normales et décrochantes normales affecte les terrains pliocènes. La compatibilité cinématique de ces failles permet de les séparer en deux groupes. Le premier indique clairement une extension (σ_3) de direction moyenne E-W (diagramme 8B2, Fig. 19), le second une extension de direction 40° N (diagramme 8B3, Fig. 19 et Tabl. II). Le bassin de Cochabamba montre une tectonique en extension récente, comme l'attestent les facettes sur les escarpements de failles (Fig. 18). Il est

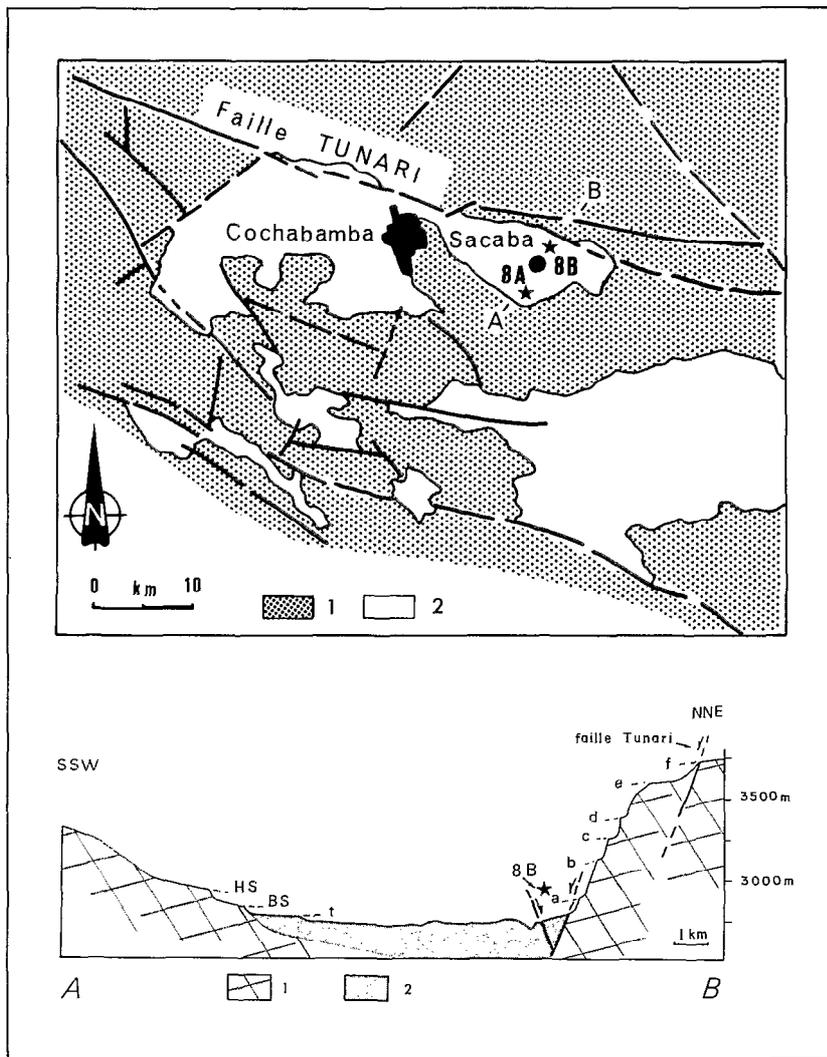


Fig. 18. — La déformation en extension dans le bassin intracordilléran de Sacaba (Cordillère orientale).

Carte — En gris : terrains antérieurs au Plio-Quaternaire ; en blanc : remplissage plio-quaternaire. La coupe AB montre six niveaux d'ablation (a à f) le long du relief de la faille Tunari et seulement trois sur le bord sud du bassin (t, BS, HS).

Tensional deformation from the intra-cordilleran basin of Sacaba (eastern Cordillera). Map — in gray: deposits prior to the Plio-Quaternary; in white: Plio-quaternary infilling. AB cross section shows six levels of ablation (from a to f) along the Tunari fault scarp and only three along the southern edge of the basin (t, BS, HS).

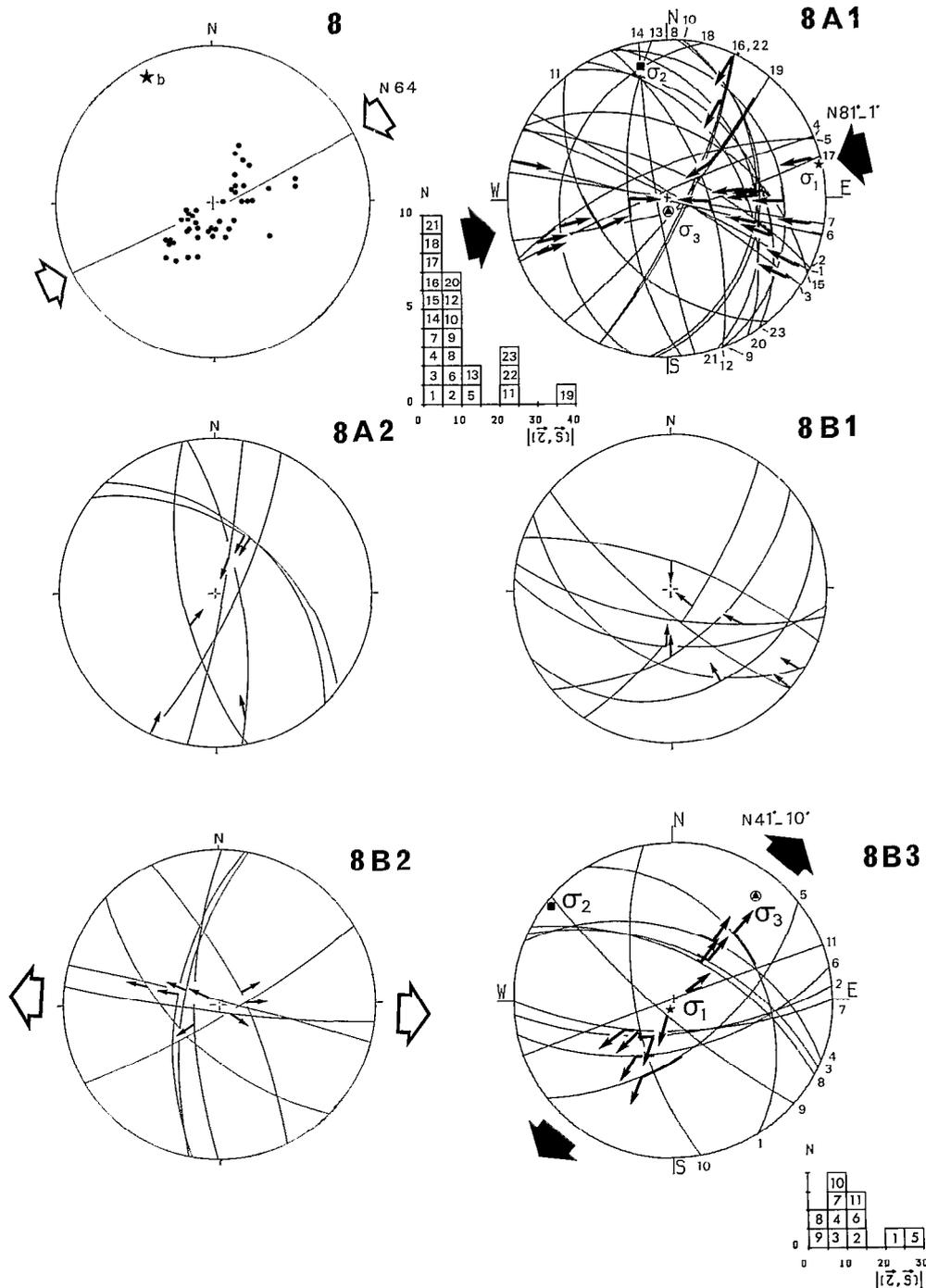


Fig. 19. — Les déformations dans le bassin intracordillérain de Sacaba (Cordillère orientale).

Diagramme 8 : plissement des sédiments pliocènes résultant d'un raccourcissement 64° N (mêmes symboles que sur la figure 5) ; diagrammes 8A1, 8A2, 8B1 : données des failles décrochantes et décrochantes inverses utilisées pour définir les directions de compression, diagrammes 8B2, 8B3 : données de failles normales et décrochantes normales, affectant le Pliocène de Sacaba, utilisées pour définir les directions d'extension. Mêmes symboles que sur la figure 10. Les sites 8A et 8B sont situés sur la figure 18.

The deformations in the intra-cordilleran basin of Sacaba (Eastern Cordillera).

Stereonet 8: folding in the pliocene sediments due to a 64° E trending shortening (same symbols as in Fig. 5). Stereonets 8A1, 8A2, 8B1: data of the strike-slip and reverse strike-slip faults used to compute compressional directions; Stereonets 8B2, 8B3: data of normal and normal strike-slip faults used to compute tensional directions. Same symbols as Fig. 10; sites 8A and 8B on Fig. 18.

possible que celle-ci résulte de l'extension 40° N, mais cela n'est pas certain puisque aucune donnée de terrain ne permet de montrer l'antériorité d'une extension par rapport à l'autre.

Le bassin de Sucre

Les sédiments de ce bassin sont attribués au Pliocène (LAVENU et BALLIVIAN, 1979) mais sans preuves paléontologiques. Ces sédiments sont plissés selon une direction axiale proche de 170° N correspondant à un raccourcissement de direction 80° N (diagramme 10A, Fig. 20). Des décroche-

ments observés sur ce même site montrent une déformation complexe. La compatibilité cinématique des failles permet de séparer deux groupes. Le premier est compatible avec une compression de direction 270° N (diagramme 10B, Fig. 20), le deuxième avec un raccourcissement de direction environ 30° N (diagramme 10C, Fig. 20). Là encore, aucun argument de terrain ne permet d'établir l'antériorité d'un groupe par rapport à l'autre.

Il n'a pas été possible de mettre en évidence dans ce bassin une déformation en extension. Seules quelques rares microfailles sont compatibles avec une extension de direction E-W.

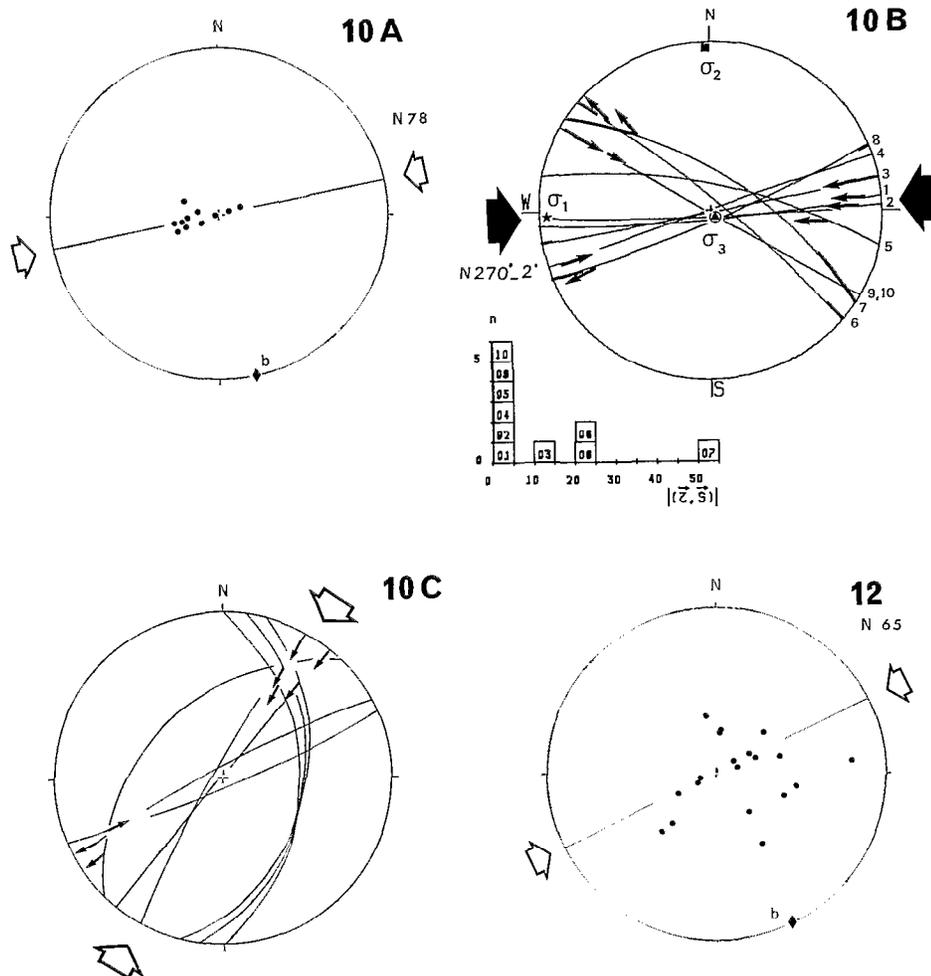


Fig. 20. — La déformation en compression dans les bassins intracordillérains de Sucre (site 10) et Tipuani (site 12). Diagrammes 10A et 12 : plis affectant les dépôts attribués au Pliocène (Sucre) ou datés du Miocène supérieur (Tipuani) (mêmes symboles que sur la figure 5) ; diagrammes 10B et 10C : données de failles décrochantes inverses utilisées pour définir les directions de compression (mêmes symboles que sur la figure 10). Les sites sont localisés sur la figure 1.

Compressional deformation from the intracordilleran basins of Sucre (site 10) and Tipuani (site 12). Stereonets 10A and 12: analyzed folds of estimated Pliocene sediments (Sucre, site 10) of Upper-Miocene sediments (Tipuani, site 12). Stereonets 10B and 10C: reverse strike-slip data faults used to compute shortening directions. Sites located on Fig. 1.

Les bassins de Tipuani et San Isidro

Le remplissage sédimentaire du bassin de Tipuani est Miocène supérieur (FORNARI *et al.*, 1987), tandis que celui de San Isidro a été attribué au Pliocène par LAVENU (1986). Dans ces deux bassins, les sédiments sont plissés. La direction de raccourcissement est 65° N à Tipuani (diagramme 12, Fig. 20) et environ 60° N à San Isidro. Dans les dépôts discordants sur les terrains plissés de Tipuani, des failles normales indiquent une extension de direction NE-SW (FORNARI *et al.*, 1987).

Le bassin de Tarija

Situé dans le sud de la Bolivie (site 18, Fig. 1), ce bassin intramontagneux est rempli de sédiments pléistocènes (TAKAI *et al.*, 1982) datés plus précisément par magnétostratigraphie (McFADDEN *et al.*, 1983) du Pléistocène inférieur (1 à 0,7 Ma). Les sédiments y sont affectés par une faible tectonique en compression qui se manifeste par de rares failles décrochantes (diagramme 18A, Fig. 21 et Tabl. I) résultant d'une compression σ_1 de direction 85° N, σ_2 étant vertical.

On n'observe pas de grandes failles normales affectant les sédiments quaternaires ; par contre, plus de 100 microfailles ont pu être mesurées dans le centre du bassin. Un premier calcul a été réalisé sur l'ensemble des failles. Celles-ci résultent d'une extension (σ_3) de direction 201° N. Mais la solution est particulière, l'ellipsoïde des contraintes est de révolution autour de l'axe σ_1 vertical. Une deuxième série de calculs a été réalisée en séparant les failles en quatre lots, de façon aléatoire. Les résultats de chaque calcul sont semblables au résultat précédent (Fig. 21, diagrammes 18-1, 18-2, 18-3, 18-4 et Tabl. II) : la direction de σ_3 varie de 192° N à 215° N et le rapport R de 0,916 à 0,960. Aucune observation de terrain n'a permis d'établir une chronologie entre éventuellement une famille de failles résultant d'une extension N-S et une autre résultant d'une extension E-W ; l'état de contrainte paraît bien être de révolution autour de l'axe σ_1 vertical.

Le bassin de Tarija est une région située topographiquement entre la zone subandine basse (où σ_1 est horizontal de direction E-W et σ_3 vertical) et les hautes Andes (où σ_1 est vertical). L'état de contrainte décrochant (σ_2 vertical) est bien compatible avec la situation topographique du bassin entre la zone subandine et les hautes Andes, si on admet que la contrainte verticale σ_{zz} est due au poids d'une

topographie compensée isostatiquement. Mais l'existence d'un régime tectonique extensif de révolution autour de σ_1 vertical pose un problème. Le régime extensif pourrait s'expliquer par une surrection qui, augmentant la topographie (le bassin de Tarija se situe actuellement à 1 900 m d'altitude) créerait une extension N-S, semblable à celle observée dans les hautes Andes. Toutefois, une telle interprétation nécessiterait que la valeur de la contrainte verticale (σ_1) soit proche de la valeur de la contrainte horizontale E-W (σ_2) ; ce n'est pas ce que l'on observe puisque c'est la valeur de σ_3 qui est voisine de celle de σ_2 .

Comparaison avec l'évolution de l'état de contrainte dans l'Altiplano

Dans les bassins pliocènes et plio-quaternaires intramontagneux de la Cordillère orientale, on observe des déformations en compression et en extension. L'analyse graphique des plis et les calculs des déviateurs de contraintes à partir des failles striées montrent qu'une déformation en compression de direction 60° N à E-W (sites 8A, 9, 10, 12) affecte ces bassins. Il lui est associé une fracturation peu exprimée dont la cinématique pourrait être compatible avec un raccourcissement de direction moyenne N-S (sites 8A, 8B, 10). Les terrains pliocènes ou attribués au Pliocène sont aussi affectés par des failles normales résultant d'extensions de direction E-W (site 8B2) et NE-SW (sites 8B3 et 12).

Par comparaison avec les déformations analysées dans l'Altiplano, on peut proposer la chronologie suivante : l'extension E-W serait du Pliocène, la phase de compression complexe montrant des raccourcissements de direction E-W et N-S serait d'âge pliocène supérieur-quaternaire ancien, l'extension NE-SW, peu marquée, pourrait être d'âge quaternaire. Mais alors que dans l'Altiplano ces déformations sont bien datées, aucune chronologie relative n'a pu être établie dans la Cordillère orientale entre les déformations compressives et extensives.

Enfin, il faut souligner la position particulière du bassin de Tarija où le régime tectonique décrochant (σ_2 vertical) correspond bien à celui attendu entre la région basse subandine et la région élevée de l'Altiplano. Mais il existe aussi un régime extensif de révolution autour de σ_1 vertical. Sa relation chronologique avec le régime décrochant n'est pas connue et il apparaît difficile de l'interpréter dans un contexte régional.

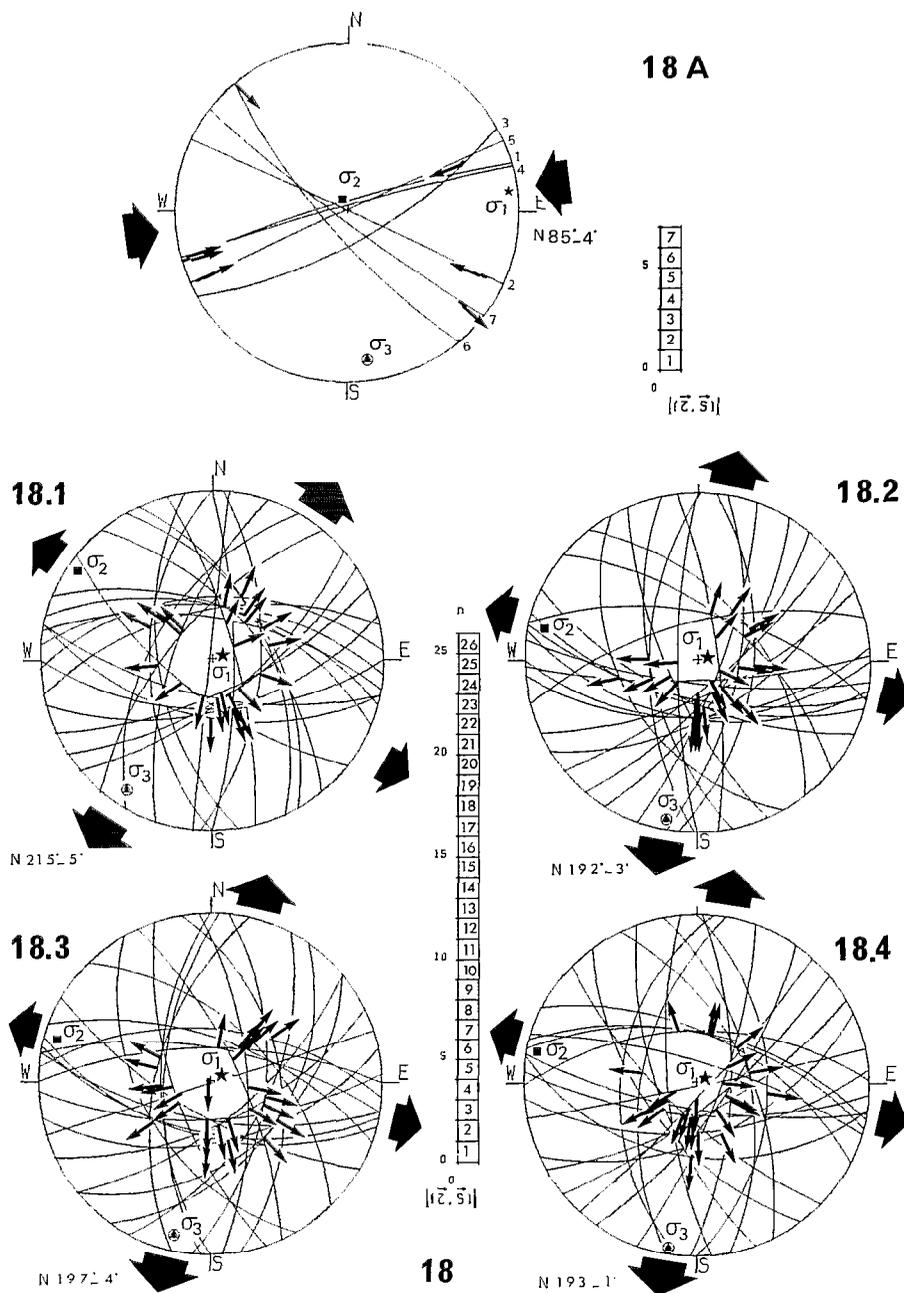


Fig. 21. — La déformation dans le bassin de Tarija (site 18).

Les sédiments pléistocènes du bassin de Tarija sont affectés par des déformations quaternaires en compression (18A) et en extension (18-1, 18-2, 18-3, 18-4). La chronologie entre ces deux événements n'a pas pu être déterminée. Les diagrammes montrent les données utilisées pour calculer ces directions de compression et d'extension (mêmes symboles que sur la figure 11). Les sites sont localisés sur la figure 1.

Deformation from the Tarija basin (site 18).

Pleistocene sediments of Tarija basin are affected by compressional (18A) and tensional (18-1, 18-2, 18-3, 18-4) Quaternary deformations. Chronology between these two events could not be determined. Stereonets: data used to compute compressional and tensional stress tensor. Site located on Fig. 1.

CONCLUSIONS

Les états de contrainte du Miocène supérieur au Quaternaire dans les Andes de Bolivie

Les études de terrain menées dans les hautes Andes de Bolivie, plus particulièrement dans le nord de l'Altiplano et dans la Cordillère orientale montrent les résultats suivants.

*Au Miocène terminal, vers 7-8 Ma, une phase tectonique compressive (phase F4) provoque un raccourcissement de direction NE-SW (Fig. 22A). L'analyse de la cinématique des failles activées au cours de cette phase montre que la direction de raccourcissement est comprise entre 25° N et 45° N. Cette direction de raccourcissement est différente de la direction de convergence 80° N des plaques Nazca et Sud-Américaine admise pour cette époque (PARDO-CASAS et MOLNAR, 1987). Il est possible que cette direction NE-SW soit liée à un effet de géométrie régionale due à la direction 120° N de la chaîne car, au Pérou méridional, la direction générale de compression est alors proche de E-W (MEGARD *et al.*, 1984 ; SÉBRIER *et al.*, 1988a). Il a été suggéré que cette phase tectonique compressive d'âge Miocène terminal pourrait être l'expression paroxysmale d'une période en compression qui aurait affecté la chaîne durant l'Oligo-Miocène (LABROUSSE et SORIA, 1987 ; BABY *et al.*, 1990 ; SEMPÉRÉ *et al.*, 1990, 1991). C'est pendant cette période oligo-miocène que la chaîne acquiert l'essentiel de son relief (SÉBRIER *et al.*, 1988a) et donc son épaissement crustal peut être dû en grande partie à un raccourcissement tectonique.*

Durant le Pliocène, entre 6 et 3 Ma, à la latitude du nord de la Bolivie, la haute chaîne est soumise à un régime tectonique extensif ; la direction d'extension est E-W (Fig. 22B). Cette extension est bien démontrée par des arguments sédimentologiques et tectoniques, principalement le long des bordures du bassin de l'Altiplano, à la limite des cordillères.

Au Pliocène terminal-Pléistocène inférieur (vers 3-2 Ma), une compression (phase F5) affecte l'ensemble de la région étudiée. La déformation, peu intense, se traduit par la formation de plis kilométriques à grand rayon de courbure et surtout par la réactivation en failles inverses et décrochantes inverses de failles anciennes. La direction de compression E-W, très homogène (Fig. 22C), est parallèle à la direction de convergence des plaques de Nazca et sud-américaine à cette époque. Toutefois, il a été également observé des failles inverses dont la cinématique est compatible avec un raccourcissement de direction N-S. En Bolivie, il semble exister une succession constante dans le temps de deux événements tectoniques : d'abord une compres-

*sion E-W puis une N-S. Par contre, au Pérou, dans le bassin de Cuzco (CABRERA *et al.*, 1991), les deux directions de raccourcissement E-W et N-S ne paraissent pas résulter de deux phases de compression distinctes se succédant dans le temps ; elles résultent d'un même événement tectonique daté du Pléistocène inférieur.*

Enfin, du Pléistocène ancien à l'Actuel, toutes les régions étudiées dans la Haute Chaîne sont affectées par une tectonique en extension de direction N-S à 20° N (Fig. 22 D). Les failles normales, souvent plurikilométriques, ont des rejets décimétriques pour les mouvements les plus récents et hectométriques pour les plus anciens. Par contre, le bassin de Tarija, dont l'altitude est nettement plus faible (1 900 m), a subi au cours de cette période une tectonique en décrochement (σ_2 vertical et σ_1 horizontal de direction E-W).

Une interprétation des changements de l'état de contrainte régional dans les Andes de Bolivie du Miocène supérieur au Quaternaire ; un effet des forces de gravité et des forces aux limites

Dans l'Altiplano, la tectonique en extension quaternaire résulte d'un état de contrainte avec σ_3 de direction N-S (σ_{yy}), σ_2 de direction E-W (σ_{xx}) et σ_1 vertical (σ_{zz}). Elle a été interprétée (SÉBRIER *et al.*, 1985, 1988b ; MERCIER *et al.*, 1987b, 1991) comme le résultat de forces de volume dues à une haute topographie compensée (DALMAYRAC et MOLNAR, 1981 ; FROIDEVAUX et ISACKS, 1984). Dans un tel modèle, la contrainte horizontale maximale (σ_{Hmax}) a une direction voisine de E-W (σ_{xx}). Elle est à peu près parallèle à la direction de convergence et résulte de la poussée de la plaque plongeante sur la lithosphère continentale andine. Dans les régions de basse topographie, dans la zone subandine, la tectonique est compressive : σ_{xx} est σ_1 et σ_{zz} est σ_3 . Dans les hautes Andes, σ_{zz} augmente du fait du poids de la Haute Chaîne ; σ_{zz} devient alors σ_1 , σ_{xx} qui est la contrainte horizontale maximale devient alors σ_2 et σ_{yy} devient σ_3 permettant ainsi à l'extension de se produire suivant une direction N-S. Les déformations en décrochement du bassin de Tarija pourraient correspondre à un état de contrainte intermédiaire (σ_2 vertical) entre les basses régions subandines et le haut plateau andin.

La tectonique en extension pliocène dans l'Altiplano est totalement différente de celle d'âge pléistocène. En effet, la direction d'extension est E-W, ce qui signifie que σ_{xx} est toujours la contrainte principale minimale (σ_{Hmin}). Il est nécessaire dans ce cas que la contrainte horizontale transmise à la lithosphère

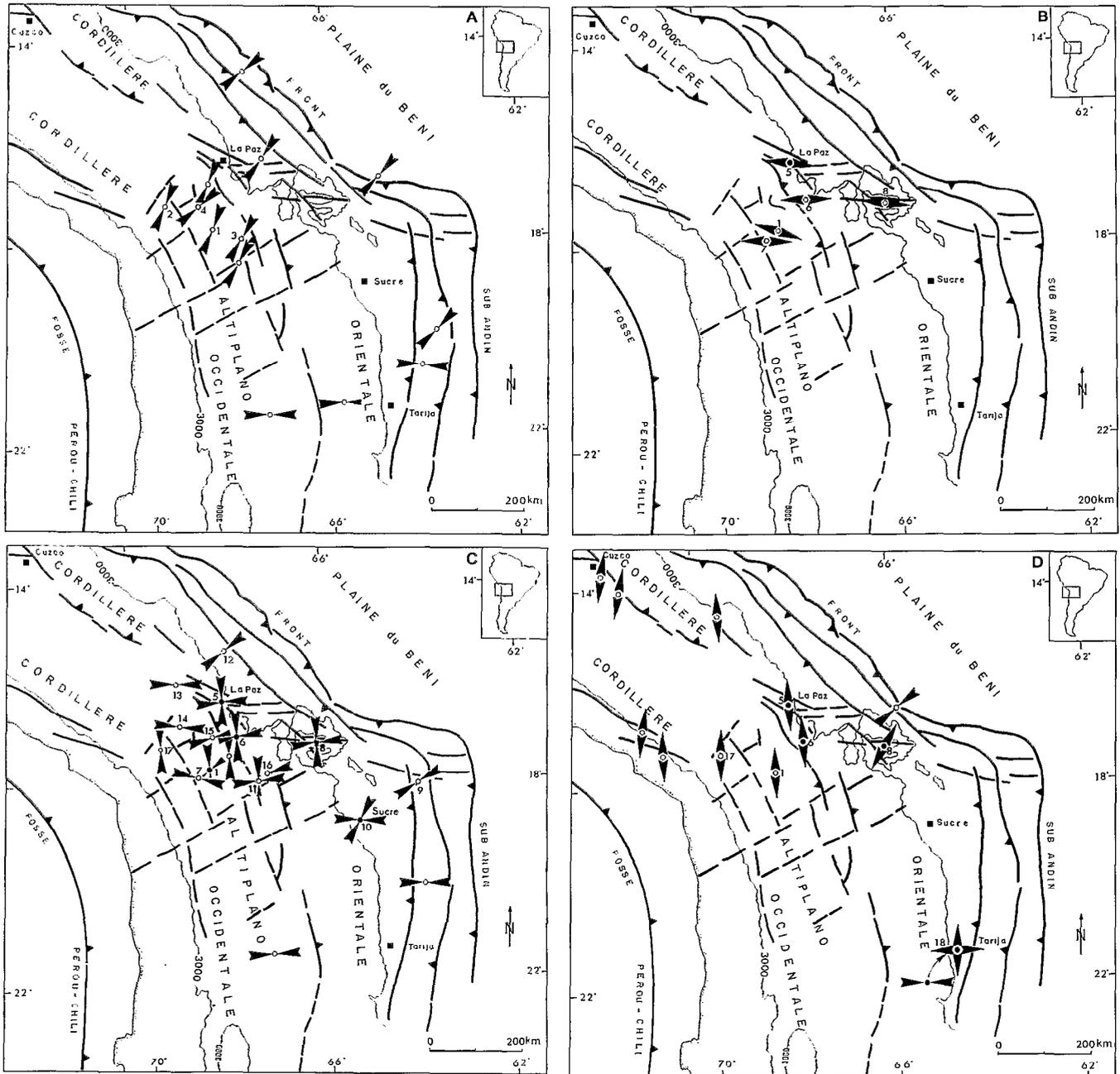


Fig. 22. — Directions principales de compression et d'extension déduites de l'analyse structurale des plis et des failles dans les Andes du nord-ouest de la Bolivie.

22A : directions de raccourcissement du Miocène supérieur. 22B : directions d'extension pliocène. 22C : directions de compression d'âge pliocène supérieur-pléistocène inférieur. 22D : directions d'extension du Quaternaire moyen à récent.

Les numéros des sites sont les mêmes que ceux de la figure 1. Les têtes des flèches sont attachées à un point noir quand les directions de contraintes sont calculées à partir des vecteurs glissement sur les failles. Elles sont attachées à un point blanc quand elles sont obtenues par une méthode graphique (axes de plis, failles quand celles-ci sont insuffisantes pour donner lieu à un calcul).

Main compressional and tensional directions deduced from structural analysis of folds and faults from the North-Western Andes of Bolivia.

22A: Upper-Miocene compressional stress directions; 22B: Pliocene tensional stress directions; 22C: Upper Pliocene-Lower Pleistocene compressional stress directions; 22D: Middle to Upper-Quaternary tensional stress directions.

Numbers of sites are the same as on Fig. 1. Convergent arrows on black circle: stress directions computed from slip vectors on faults. Convergent arrows on white circle: stress directions graphically determined from axis of fold and faults.

continentale soit inférieure à celle agissant dans le cas précédent (MERCIER *et al.*, 1987b ; CABRERA *et al.*, 1989). Une possibilité pour que les forces horizontales aux limites deviennent faibles est que la convergence diminue et même devienne négative, par exemple dans le cas d'une migration de la plaque plongeante vers l'océan. Cela peut se produire si le *slab* de grande longueur « sombre » dans l'asthénosphère sous l'effet de son propre poids (MERCIER *et al.*, 1987b ; SOREL *et al.*, 1988 ; CABRERA *et al.*, 1989 ; SÉBRIER et SOLER, 1991).

La tectonique en compression d'âge pliocène supérieur-pléistocène inférieur dans l'Altiplano est aussi nettement différente du régime tectonique actuel. Comme aucune donnée morphologique ne témoigne d'une brusque diminution de l'altitude de la Haute Chaîne au cours de cette période, il faut donc admettre que σ_{zz} est resté à peu près constant et que, nécessairement, σ_{xx} a dû augmenter pour que l'état de contrainte dans les hautes Andes soit semblable à celui agissant actuellement dans les basses régions subandines. L'augmentation de la contrainte transmise à la lithosphère continentale andine résulte d'un couplage fort entre les deux plaques océanique et continentale. Ce couplage peut être le résultat de plusieurs causes. On peut envisager que le *slab*, très long au cours du Pléistocène, se soit rompu, ce qui a provoqué sa remontée et donc une augmentation du couplage.

On peut également suggérer qu'une augmentation de la vitesse de convergence ait augmenté le couplage et en conséquence la contrainte horizontale transmise à la lithosphère andine. Quel que soit le cas, il en résulte que la direction de compression σ_1 est suivant la direction de σ_{xx} , c'est-à-dire voisine de E-W, en gros parallèle à la convergence. Ceci est en accord avec la direction de compression responsable de la formation des structures majeures de cette période. Toutefois, cela n'explique pas la cinématique de certaines failles résultant d'un raccourcissement N-S, formées également au cours de cette période. Nous suggérons que celles-ci sont dues à des déformations locales hétérogènes dans un régime régional de compression E-W.

En conclusion, dans les Andes de Bolivie comme du Pérou méridional (MERCIER, 1981 ; SÉBRIER *et al.*, 1985, 1988b ; LAVENU, 1986 ; MERCIER *et al.*, 1991) situées au-dessus d'un plan de subduction à pendage de 30°, on observe clairement des changements de l'état régional de contrainte dans l'espace et dans le temps. De tels changements ont aussi été démontrés au-dessus d'autres zones de subduction, comme dans l'arc égéen par exemple (MERCIER *et al.*, 1987). Ceux-ci trouvent une explication simple au moins à l'échelle régionale (> 100 km) par une interaction entre forces (verticales) de volume et forces (horizontales) aux limites du système.

Manuscrit accepté par le Comité de rédaction le 10 janvier 1993.

BIBLIOGRAPHIE

- AHLFELD (F.E.), 1967. — La línea geotectónica "Ichilo". *Boletín del Instituto Boliviano del Petróleo*, 7, 2 : 7-13.
- AHLFELD (F.E.), BRANISA (L.), 1960. — Geología de Bolivia. *Instituto Boliviano del Petróleo*. La Paz, Don Bosco edit., 245 p.
- ALLMENDINGER (R.W.), RAMOS (V.A.), JORDAN (T.E.), PALMA (M.), ISACKS (B.L.), 1983. — Paleogeography and Andean structural geometry, northwest Argentina. *Tectonics*, 2 : 1-16.
- ASCARRUNZ (R.), 1973. — Contribución al conocimiento geológico del área comprendida entre los pueblos de Viacha, Corocoro y Umala. *Sociedad Geológica de Bolivia. Convención Nacional de Geología, Anal. III*, 20 : 29-64.
- BABY (P.), SEMPÉRÉ (T.), OLLER (J.), BARRIOS (L.), HÉRAIL (G.), MAROCCO (R.), 1990. — Un bassin en compression d'âge oligo-miocène dans le sud de l'Altiplano bolivien. *C.R. Acad. Sci. Paris*, II, 311 : 341-347.
- BARAZANGI (M.), ISACKS (B.), 1976. — Spatial distribution of earthquakes and subduction of the Nazca plate beneath South America. *Geology*, 4, 11 : 686-692.
- BERRY (E.W.), 1922. — Late tertiary plants from Jancocata, Bolivia. *The John Hopkins University Studies in Geology Bulletin*, 4 : 205-220.
- BLANCO (M.), 1980. — Evolución plio-cuaternaria de la cuenca de Charaña (Cordillera occidental, Bolivia). Tesis de grado, UMSA, La Paz, 64 p.
- BROCKMANN (C.), CASTAÑOS (A.), SUAREZ (R.), TOMASI (P.), 1972. — Estudios geológicos de la Cordillera oriental de las Andes en la zona central de Bolivia (region del Chapare). *Sociedad Geológica de Bolivia, Boletín*, 189 : 3-36.
- CABRERA (J.), SÉBRIER (M.), MERCIER (J.L.), 1991. — Plio-Quaternary geodynamic evolution of a segment of the Andean Peruvian Cordillera. *Tectonophysics*, 190 : 331-362.
- CAREY (E.), 1979. — Recherche des directions principales de contraintes associées au jeu d'une population de failles. *Rev. Géogr. Phys. Géol. Dyn.*, 21 (1) : 57-66.
- CAREY (E.), BRUNIER (B.), 1974. — Analyse théorique et numérique d'un modèle élémentaire appliqué à l'étude d'une population de failles. *C.R. Acad. Sci. Paris*, sér. D, 269 : 891-894.
- CHINN (D.S.), ISACKS (B.L.), 1983. — Accurate source depths and focal mechanisms of shallow earthquakes in western South America and in the New Hebrides Island Arc. *Tectonics*, 2, 6 : 529-563.
- CLAPPERTON (C.M.), 1979. — Glaciation in Bolivia before 3.27 myr. *Nature*, 277 : 375-377.
- DALMAYRAC (B.), MOLNAR (P.), 1981. — Parallel thrust and normal faulting in Peru and constraints on the state of stress. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 55 : 473-481.
- DELFAUD (J.), 1977. — La sédimentogenèse en liaison avec la dynamique des bassins. Rôle du climat. *Bull. Centre Rech. Expl.-Produc. Elf-Aquitaine*, 1, 1 : 191-216.

- DOBROVOLNY (E.), 1962. — Geología del valle de La Paz. Bolivia, Departamento Nacional de Geología, 3 (esp.), 153 p.
- DOUGLAS (J.A.), 1914. — Geological sections through the Andes of Peru and Bolivia. I. From the coast at Arica in the north of Chile to La Paz and the bolivian "Yungas". *Quarterly Journal of Geological Society of London*, 277, 70 : 1-49.
- EVERNDEN (J.F.), KRIZ (S.), CHERRONI (C.), 1966. — Correlaciones de las formaciones terciarias de la cuenca altiplanica a base de edades absolutas determinadas por el método potasio-argon. Servicio Geológico Boliviano, *Hoja informativa* n° 1.
- EVERNDEN (J.F.), KRIZ (S.), CHERRONI (C.), 1977. — Potassium-Argon ages of some bolivian rocks. *Economic Geology*, 72 : 1042-1061.
- FERRANDES (E.), MARTINEZ (E.), VANDENHOECK (A.), 1977. — Investigación geofísica por sondeos eléctricos. Zona del Altiplano entre Viacha y las cuencas de La Paz y Achocalla. Plan de Desarrollo de la Ciudad de La Paz. HAM La Paz. Consultoras BRGM-BCEOM- Prudencio Claros y asociados. *Informe Geológico*, 4, 38 p.
- FORNARI (M.), HÉRAIL (G.), VISCARRA (G.), LAUBACHER (G.), ARGOLLO (J.), 1987. — Sédimentation et structure du bassin de Tipuani-Mapiri : un témoin de l'évolution du front amazonien des Andes du nord de la Bolivie. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 305, sér. II : 1303-1308.
- FROIDEVAUX (C.), ISACKS (B.L.), 1984. — The mechanical state of the lithosphere in the Altiplano-Puna segment of the Andes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 71 : 305-314.
- GRANGE (F.), CUNNINGHAM (P.), GAGNEPAIN (J.), HATZFELD (D.), MOLNAR (P.), OCOLA (L.), RODRIGUEZ (A.), STOCK (S.W.), SUAREZ (G.), 1984. — The configuration of the seismic zone and the downgoing slab in southern Peru. *Geophys. Res. Lett.*, 11, 1 : 38-41.
- HOFFSTETTER (R.), MARTINEZ (C.), MUNOZ-REYES (J.), TOMASI (P.), 1971. — Le gisement d'Ayo Ayo (Bolivie), une succession stratigraphique Pliocène-Pléistocène datée par des mammifères. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 273 : 2472-2475.
- HOFFSTETTER (R.), MARTINEZ (C.), TOMASI (P.), 1972. — Nouveaux gisements de mammifères néogènes dans les couches rouges de l'Altiplano bolivien. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 275 : 739-742.
- ISACKS (B.), JORDAN (T.E.), ALLMENDINGER (R.W.), RAMOS (V.A.), 1982. — La segmentación tectónica de los Andes centrales y su relación con la geometría de la placa de Nazca subductada. 5° Congreso Latino-Americano de Geología, Argentina, Actas III : 587-606.
- JORDAN (T.E.), ISACKS (B.L.), ALLMENDINGER (R.W.), BREWER (J.A.), ANDO (C.J.), 1983. — Andean tectonics related to geometry of subducted Nazca plate. *Geological Society of America*, 94 : 341-361.
- KUSSMAUL (S.), JORDAN (L.), PLOSKONKA (E.), 1975. — Isotopic ages of tertiary volcanic rocks of SW Bolivia. *Geol. Jahrb.*, Reihe B, 14 : 11-120.
- LABROUSSE (B.), SORIA (E.), 1987. — Nouveaux résultats sur la formation Coniri entre les villages de Viacha, Corocoro et Tiwanaku (Altiplano nord de la Bolivie). *Orstom*, Paris, Séminaire « Géodynamique Andes centrales » : 61-63.
- LAVENU (A.), 1977. — Neotectónica de los sedimentos plio-cuatenarios de la cuenca de la Paz (Bolivia). *UMSA, Revista de Geociencias*, 1, 1 : 31-56.
- LAVENU (A.), 1978. — Néotectonique des sédiments plio-quaternaires du nord de l'Altiplano bolivien (région de la Paz, Ayo Ayo, Umalala). *Cah. Orstom, sér. géologie*, X, 1 : 115-126.
- LAVENU (A.), 1981a. — Origine et évolution néotectonique du lac Titicaca. *Rev. Hydrobiol. trop.*, 14, 4 : 289-297.
- LAVENU (A.), 1981b. — Neotectonic evolution in the Northern Bolivian Altiplano and the eastern and western Cordilleras during upper Tertiary and Quaternary. Stockholm, *Bull. of the INQUA Neotectonics Commission* : 79-81.
- LAVENU (A.), 1981/82. — Derniers résultats acquis concernant les études néotectoniques en Bolivie. *Cah. Orstom, sér. Géologie*, XII, 1 : 23-28.
- LAVENU (A.), 1984a. — Un exemple de bassin intramontagneux en extension : le bassin andin pliocène de La Paz (Bolivie). 10° RAST, Bordeaux, France : 23-28.
- LAVENU (A.), 1984b. — Âge pliocène de la Formation Remedios dans l'Altiplano bolivien. Caractères de la tectonique plio-cène. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 299 : 1051-1054.
- LAVENU (A.), 1986. — Étude néotectonique de l'Altiplano et de la Cordillère orientale des Andes boliviennes. Thèse Doct., univ. Paris-Sud, 434 p.
- LAVENU (A.), BALLIVIAN (O.), 1979. — Estudios neotectónicos de las cuencas de las regiones de Cochabamba, Sucre, Tarija, Cordillera oriental. Bolivia. *Revista Academia Nacional de Ciencias Bolivia*, 2, 3 : 107-129.
- LAVENU (A.), BONHOMME (M.G.), VATIN-PÉRIGNON (N.), DEPATCHÈRE (P.), 1989. — Neogene magmatism in the Bolivian Andes between 16° S and 18° S : stratigraphy and K/Ar geochronology. *Jour. South American Earth Sci.*, 2, 1 : 35-47.
- LAVENU (A.), MAROCCO (R.), 1984. — Sédimentation continentale et tectonique d'une chaîne liée à une zone de subduction : l'exemple des Andes centrales (Pérou-Bolivie) pendant le Tertiaire. *Bull. Centre Rech. Expl.-Produc. Elf-Aquitaine*, 8, 1 : 57-70.
- MANCILLA (W.L.), 1979. — Geología del Plio-Cuatenario de la cuenca de Sacaba-Cochabamba. La Paz, Tesis de grado, UMSA, 50 p.
- MARSHALL (L.G.), SWISHER (C.), LAVENU (A.), HOFFSTETTER (R.), CURTIS (G.), 1992. — Geochronology of the mammal-bearing late Cenozoic on the northern Altiplano, Bolivia. *Jour. of South Amer. Earth Sci.* 5, 1 : 1-19.
- MARTINEZ (C.), 1980. — Structure et évolution de la chaîne hercynienne et de la chaîne andine dans le nord de la Cordillère des Andes de Bolivie. *Trav. et Doc. Orstom*, n° 19 : 352 p.
- Mc FADDEN (B.J.), SILES (O.), ZEITLER (P.), JOHNSON (N.M.), CAMPBELL (K.E.) Jr., 1983. — Magnetic polarity stratigraphy of the Middle Pleistocene (Ensenadan) Tarija Formation of Southern Bolivia. *Quaternary Research*, 19 : 172-187.
- Mc FADDEN (B.J.), CAMPBELL (K.E.), CIFELLI (R.L.), SILES (O.), JOHNSON (N.M.), NAESER (C.W.), ZEITLER (P.K.), 1985. — Magnetic polarity stratigraphy and mammalian fauna of the Deseadan (Late Oligocene-early Miocene) Salla beds of Northern Bolivia. *Journ. Geology*, 93 : 223-250.
- MÉGARD (F.), NOBLE (D.C.), Mc KEE (E.), BELLON (H.), 1984. — Multiple pulses of Neogene deformation in the Ayacucho intermontane basin, Andes of central Peru. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 95, 9 : 1108-1117.
- MÉGARD (F.), PHILIP (H.), 1976. — Plio-Quaternary tectono-magmatic zonation and plate tectonics in the central Andes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 33 : 231-238.
- MERCIER (J.L.), 1981. — Extensional-compressional tectonics associated with the Aegean Arc : comparison with the Andean Cordillera of South Peru-North Bolivia. *Phil. trans. R. Soc. London*, A 300 : 337-355.
- MERCIER (J.L.), CAREY-GALHARDIS (E.), 1989. — Regional state of stress and characteristic fault kinematics instabilities shown by aftershock sequences : the aftershock sequences of the 1978 Thessaloniki (Greece) and 1980 Campania-Lucania (Italia) earthquakes as examples. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 92 : 247-264.

- MERCIER (J.L.), SÉBRIER (M.), LAVENU (A.), CABRERA (J.), BELLIER (O.), DUMONT (J.F.), MACHARÉ (J.), 1991. — Changes in the tectonic regime above a subduction zone of Andean type : the Andes of Peru and Bolivia during the Pliocene-Pleistocene. *J. Geophys. Res.*, 97, B8 : 11945-11982.
- MERCIER (J.L.), SOREL (D.), SIMEAKIS (K.), 1987. — Changes in the state of stress in the overriding plate of a subduction zone : the Aegean Arc from the Pliocene to the Present. *Annales tectonicae*, 1, 1 : 20-39.
- MEYER (H.), MURILLO (J.), 1961. — Sobre la geología en las provincias Aroma-Pacajes y Carangas. *Departamento Nacional de Geología Boletín*, 1 : 47 p.
- NAESER (C.W.), Mc KEE (E.H.), JOHNSON (N.M.), Mc FADDEN (B.J.), 1987. — Confirmation of a Late Oligocene-early Miocene age of the Deseadan Salla beds of Bolivia. *J. of Geology*, 95 : 825-828.
- PARDO-CASAS (F.), MOLNAR (P.), 1987. — Relative motion of the Nazca (Farallon) and South American plates since late cretaceous time. *Tectonics*, 6, 3 : 233-248.
- PERRODON (A.), 1971. — Essai de classification des bassins sédimentaires. *Sciences de la Terre*, 16, 2 : 197-227.
- RADELLI (L.), 1966. — Nuevos datos sobre tectónicas de los Andes bolivianos a partir de una foto Gemini V y conocimientos de campo. Grenoble, *Trav. Lab. Géologie*, t. 42.
- RODRIGO (L.A.), CASTAÑOS (A.), 1975. — Estudio sedimentológico de las formaciones "Tiwanaku, Coniri y Kollu Kollu" del Altiplano septentrional boliviano. *Sociedad Geológica de Bolivia*, 22 : 85-126.
- SACKS (I.S.), 1977. — Interrelationships between volcanism, seismicity and anelasticity in western South America. *Tectonophysics*, 37 : 131-139.
- SÉBRIER (M.), LAVENU (A.), FORNARI (M.), SOULAS (J.P.), 1988a. — Tectonics and uplift in Central Andes (Peru, Bolivia and Northern Chile) from Eocene to Present. *Géodynamique*, 3 (1-2) : 85-106.
- SÉBRIER (M.), MAROCCO (R.), GROSS (J.J.), MACEDO (S.), MONTOYA (M.), 1979. — Evolución neogéna del piedemonte pacífico de los Andes del sur del Perú. 2º Congreso geológico Chileno, Arica : 171-188.
- SÉBRIER (M.), MERCIER (J.L.), MACHARÉ (J.), BONOT (D.), CABRERA (J.), BLANC (J.L.), 1988b. — The state of stress in an overriding plate situated above a flat slab : the Andes of Central Peru. *Tectonics*, 7 (4) : 895-928.
- SÉBRIER (M.), MERCIER (J.L.), MÉGARD (F.), LAUBACHER (G.), CAREY-GAILHARDIS (E.), 1985. — Quaternary normal and reverse faulting and the state of stress in the Central Peru. *Tectonics*, IV, 7 : 739-780.
- SÉBRIER (M.), SOLER (P.), 1991. — Tectonics and magmatism in the Peruvian Andes from Late Oligocene time to the Present. In : R.S. Harmon et G.W. Rapela (Eds), GSA Spec. paper "Andean magmatism and its tectonic setting", 265 : 259-278.
- SEMPÉRÉ (T.), BABY (P.), OLLER (J.), HÉRAIL (G.), 1991. — La nappe de Calazaya : une preuve de raccourcissements majeurs gouvernés par des éléments paléostratigraphiques dans les Andes boliviennes. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 312, sér. II : 77-83.
- SEMPÉRÉ (T.), HÉRAIL (G.), 1987. — Importancia de los cabalgamientos en la estructuración de los Andes bolivianos. Ejemplos de dos grandes cortes estructurales. Xº Congr. Geol. Argentino.
- SEMPÉRÉ (T.), HÉRAIL (G.), OLLER (J.), BONHOMME (M.G.), 1990. — Late Oligocene-early Miocene major tectonic crisis and related basin in Bolivia. *Geology*, 18 : 946-949.
- SERVANT (M.), 1977. — Le cadre stratigraphique du Plio-Quaternaire de l'Altiplano des Andes tropicales en Bolivie. Recherches françaises sur le Quaternaire INQUA, *Bull. AFEQ*, 1, 50 : 323-327.
- SHEFFELS (B.M.), KLEPACKI (D.W.), 1985. — The Cochabamba fault system: a left-slip fault system in the Elbow region of the Andes. *EOS*, 66, 46 : T41, B-09 : 1088.
- SIRVAS (F.), TORRES (E.), 1966. — Consideraciones geológicas de la zona noroeste de la provincia Pacajes del Departamento de La Paz. *Boletín del Instituto Boliviano del Petróleo*, 6, 1 : 54-64.
- SOREL (D.), MERCIER (J.L.), KERAUDREN (B.), CUSHING (M.), 1988. — Le rôle de la traction de la lithosphère subductée dans l'évolution géodynamique plio-pléistocène de l'arc égéen : mouvements verticaux alternés et variations du régime tectonique. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 307 : 1986-1988.
- STAUDER (W.), 1975. — Subduction of the Nazca plate under Peru as evidence by focal mechanisms and by seismicity. *Journal of Geophysical Research*, 80, 8 : 1053-1064.
- SWANSON (K.E.), NOBLE (D.C.), Mc KEE (E.H.), SEMPÉRÉ (T.), MARTINEZ (C.), CIRBIAN (M.), 1987. — Major revisions in the age of rocks units and tectonic events in the northern Altiplano basin of Bolivia. Abstracts with programs, GSA, Cordilleran Section : 456.
- TAKAI (F.), MIZUNO (T.), IWASAKI (Y.), TANAKA (K.), YOSHIDA (A.), 1982. — Tarija mammal-bearing formation in Bolivia. The Research Institut of Evolutionary Biology, Tokyo, 3 : 1-72.