

# Évolution géodynamique mio-pliocène et quaternaire des bassins de la cordillère occidentale du Nord-Pérou

## Les bassins de Cajabamba, San Marcos et Namora (Département de Cajamarca)

Olivier BELLIER<sup>(1,2)</sup>, Michel SÉBRIER<sup>(1)</sup>, Françoise GASSE<sup>(3)</sup>, Elisabeth FOURTANIER<sup>(3)</sup>  
et Isaacs ROBLES<sup>(4)</sup>

---

**Résumé :** *Après la phase majeure de déformation d'âge éocène de la chaîne andine, des bassins intra-cordillérains s'installent dans les méga-structures de la Cordillère occidentale du Nord-Pérou. Ces bassins (Cajabamba, San Marcos et Namora) s'organisent parallèlement aux accidents majeurs de la chaîne. Ce sont des demi-grabens où s'accumulent au cours du Miocène des dépôts fluvio-lacustres. Durant cette période, l'état de contrainte correspond à une extension dont la direction est essentiellement ENE-WSW. Les bassins miocènes sont caractérisés par un taux de sédimentation modéré de l'ordre de 0,1 mm/an en moyenne. A la fin du Néogène et au début du Quaternaire, la Cordillère occidentale est affectée par deux épisodes tectoniques compressifs-décrochants dont les directions de compression sont WNW-ESE puis N-S. Au cours du Quaternaire une extension de direction N-S s'instaure. La cinématique de la faille normale de Chaquilbamba, au sud de Cajabamba, qui fut réactivée en 1937, montre que cette tectonique est encore active. Les régimes tectoniques néogènes et quaternaires sont les conséquences géodynamiques des forces de volume dues à la haute topographie et des forces de bordure liées au couplage des plaques Nazca-Amérique au niveau de la zone de subduction.*

**Mots-clés :** Tectonique - Compression - Extension - Demi-graben - Sédimentation  
- Néogène - Quaternaire - Andes centrales - Pérou septentrional.

**Abstract :** *Mio-Pliocene and Quaternary geodynamical evolution of basins in the Western Cordillera of Northern Peru : the basins of Cajabamba, San Marcos and Namora (District of Cajamarca).* After the main Eocene shortening (Incaic phase) that affects the High Andes, several basins have been initiated along major faults in the Western Cordillera of Northern Peru : the Cajabamba, San Marcos, and Namora basins. They correspond to half-grabens infilled by Miocene fluvio-lacustrine deposits. We measured Miocene synsedimentary and post-sedimentary extensional tectonics which show ENE-WSW and NE-SW trending extensional directions. The mean sedimentation rate of these half-grabens is moderate : 0.1 mm/year. Two WNW-ESE and N-S trending strike-slip compressional phases, respectively of Late Neogene and Early Pleistocene ages, postdate the Miocene extension and predate a N-S trending extensional tectonics. This latter took place during the Quaternary. The 1937 Chaquilbamba normal fault reactivation testifies that this N-S trending extension corresponds to the present-day tectonic regime. The states of stress in the High Andes were produced by a combination of edge and body forces. Edge forces are related to the convergence forces on the South American plate limit whereas body forces are the gravity forces due to the Andean high topography.

**Key words :** Tectonics - Compression - Extension - Half-graben - Sedimentation  
- Neogene - Quaternary - Central Andes - Northern Peru.

---

(1) U.A. CNRS - Géophysique et Géodynamique interne, Bât. 509, Université de Paris-Sud, 91405 Orsay, France.

(2) ORSTOM - U.R. 105, 213, rue La Fayette, 75480 Paris, Cedex 10, France.

(3) Laboratoire d'Hydrogéologie et de Géochimie isotopique, Bât. 504, Université de Paris-Sud, 91405 Orsay, France.

(4) Instituto Geofísico del Perú, Apartado 3747, Lima 100, Pérou.

**Resumen :** Evolución geodinámica mio-pliocena y cuaternaria de las cuencas de la Cordillera Occidental del Perú : las cuencas de Cajabamba, San Marcos y Namora (departamento de Cajamarca). Después de la fase de mayor deformación de la Cadena Andina del Eoceno, se instalan cuencas intracordilleras a lo largo de las megaestructuras de la Cordillera Occidental del Norte del Perú. Estas cuencas (Cajabamba, San Marcos y Namora) se organizan paralelamente a los accidentes más importantes de la cadena. Dichas cuencas son semi-grabens, donde se acumularon depósitos fluvio-lacustres durante el Mioceno. Durante este período, el estado de esfuerzos corresponde a una extensión de dirección esencialmente ENE-WSW. Las cuencas miocenas se caracterizan por una subsidencia moderada promedia de 0.1 mm/año. Al final del Neógeno y al principio del Cuaternario, la Cordillera se ve afectada por dos episodios tectónicos compresivos-transcurrentes con direcciones de esfuerzos  $\sigma_1$  WNW-ESE y luego N-S. En el transcurso del Cuaternario, se establece una extensión de dirección N-S. La falla normal de Chaquibamba, reactivada en 1937, es prueba de la actividad actual de esta tectónica. El ambiente tectónico neógeno y cuaternario se debe a la combinación de las fuerzas de volumen relacionadas a la alta topografía y las fuerzas de borde ligadas al acoplamiento de las placas Nazca-América, a nivel de la zona de subducción.

**Palabras claves :** Tectónica - Compresión - Extensión - Sedimentación - Demi-graben - Neógeno - Cuaternario - Andes Centrales - Norte del Perú.

## INTRODUCTION

Les Andes péruviennes correspondent à une chaîne cordillère associée à une subduction active depuis au moins le Jurassique terminal (DALMAYRAC *et al.*, 1980). La période miocène inférieure à actuelle est caractérisée par une vitesse de convergence rapide entre les plaques de Nazca et Amérique du Sud (PARDO-CASAS et MOLNAR, 1987) et une direction de convergence de N080°E, environ orthogonale à la fosse (PILGER, 1984).

Les bassins de Cajabamba, San Marcos et Namora sont localisés dans la partie est de la Cordillère occidentale du Nord Pérou (fig. 1), où les altitudes sont modérées par rapport au reste des Andes péruviennes. Les vallées sont comprises entre 2 200 et 2 500 m d'altitude alors que les reliefs culminent au-dessus de 4 000 m. Nous avons calculé l'altitude moyenne de la Cordillère sur une aire de 10 000 km<sup>2</sup> couvrant la région étudiée. Celle-ci est modérée, de l'ordre de 3 100 m (BELLIER, 1989).

Les bassins intra-cordillérains étudiés s'installent au cours du Miocène dans les structures tectoniques régionales (fig. 1). Ces bassins n'ont pas fait l'objet d'études approfondies, mis à part l'ébauche du cadre sédimento-tectonique des bassins de San Marcos et Cajabamba, développée par MOURIER (1988). Leur étude présentait donc un grand intérêt pour diverses raisons :

- ils sont le lieu d'une accumulation de dépôts sédimentaires néogènes et quaternaires qui ont pu enregistrer les différents événements tectoniques régionaux synchrones et postérieurs aux remplissages ;
- étant situés dans des secteurs d'orientations différentes E-W, NW-SE et N-S de la Cordillère, l'étude de ces bassins permettra de montrer l'in-

fluence des structures majeures préexistantes sur le champ de contrainte ;

— l'étude de l'état de contrainte actuel dans cette région où l'altitude de la Cordillère est relativement faible permettra de montrer, d'autre part, l'influence d'une topographie modérée sur l'état de contrainte.

Certains bassins intracordillérains se sont formés au cours de phases tectoniques compressives ; ce sont par exemple les bassins d'Ayacucho d'âge miocène supérieur (6 à 7 Ma ; MEGARD *et al.*, 1984) et de Lircay d'âge miocène inférieur (21 à 17 Ma ; MEGARD *et al.*, 1983). L'étude des bassins miocènes de Namora, San Marcos et Cajabamba confirme que la genèse d'autres bassins des Andes centrales s'effectue lors de régimes tectoniques extensifs ; c'est le cas, au cours du Pliocène, des bassins du Calleron de Huaylas au pied de la Cordillère blanche (BONNOT, 1984 ; BONNOT *et al.*, 1988), de Cuzco au Pérou central (CABRERA, 1988 ; CABRERA *et al.*, 1990) et de La Paz dans l'Altiplano bolivien (LAVENU, 1986).

Cette étude des bassins de Namora, San Marcos et Cajabamba est basée sur une cartographie détaillée des bassins (1 : 25 000), une analyse bio-stratigraphique, radio-chronologique et sédimentologique des séries de remplissage sédimentaire et volcano-sédimentaire et d'autre part, sur une analyse des déformations et de la cinématique des failles. La bio-stratigraphie est basée sur l'analyse des assemblages de diatomées échantillonnées dans les séries lacustres et palustres. Les analyses radio-chronologiques sont des analyses K/Ar effectuées par M. BONHOMME sur les biotites contenues dans des échantillons de tufs dacitiques interstratifiés dans les séries de remplissage sédimentaire. Les vecteurs glissement sur les plans de faille ont été traités par une méthode numérique (CAREY, 1979) qui permet de calculer l'état de contrainte déviatorique responsable du glissement sur les failles.

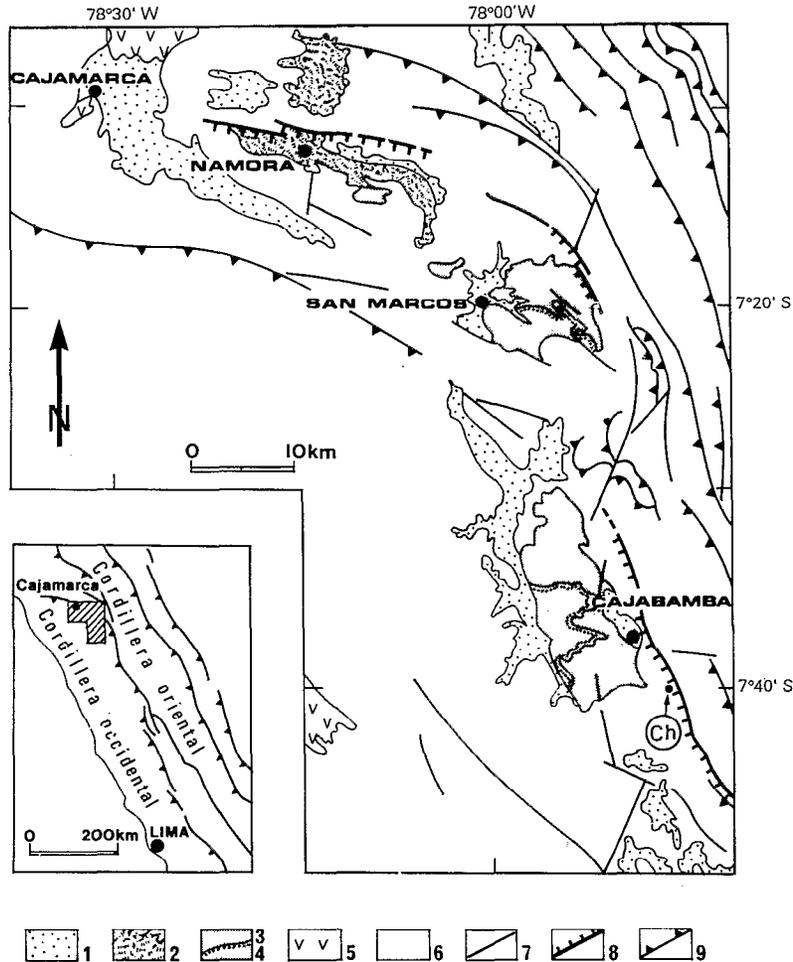


Fig. 1. — Schéma structural de localisation des bassins de Namora, San Marcos et Cajabamba (d'après les cartes géologiques de REYES (1980) et MOURIER (1988) et nos données de terrain). (1) dépôts plio-quaternaires ; (2) formation Namora ; (3) formation Condebamba ; (4) formation Cajabamba ; (5) volcanisme tertiaire ; (6) substratum mésozoïque ; (7) failles ; (8) failles réactivées en failles normales au Miocène ; (9) chevauchements et failles inverses des écaïlles du Marañon et de la déflexion de Cajamarca ; Ch : localisation de la faille de Chaquilbamba.

*Structural map of the Namora, San Marcos and Cajabamba basins (according to geological maps by REYES (1980) and MOURIER (1988) and our field data). (1) Plio-Quaternary sediments ; (2) Namora Formation ; (3) Condebamba Formation ; (4) Cajabamba Formation ; (5) Cenozoic volcanism ; (6) Mesozoic bebrock ; (7) Faults ; (8) Miocene reactivated normal faults ; (9) Thrusts and reverse faults of the Marañon Thrust and Fold Belt and of the Cajamarca deflexion ; Ch : Location of the Chaquilbamba active fault.*

## CADRE GÉOLOGIQUE RÉGIONAL

La phase incaïque définie par STEINMANN (1929) constitue la phase majeure de la tectonique andine. Elle est responsable au cours de l'Eocène supérieur (44-38 Ma), de l'essentiel de la mise en place des écaïlles du Marañon et des déformations de la déflexion de Cajamarca (NOBLE *et al.*, 1979, 1990 ; MEGARD, 1984 ; MOURIER, 1988). La plupart des structures incaïques ont joué ensuite lors de compressions

oligo-miocènes. Les analyses géologiques dans les Andes centrales ont permis de mettre en évidence 4 compressions d'âge oligocène supérieur et miocène, datées respectivement à 26 Ma, 15-17 Ma, 10 Ma et 6-7 Ma (e.g. MEGARD *et al.*, 1984 ; SEBRIER *et al.*, 1988b). C'est également au cours du Miocène que s'effectue, de manière discontinue, l'essentiel de la surrection cordilléraine (FARRAR et NOBLE, 1976 ; SEBRIER *et al.*, 1988b ; NOBLE *et al.*, 1990). Au Nord Pérou, où des coulées pyroclastiques scellent une surface d'érosion miocène et remplissent les paléovallées,

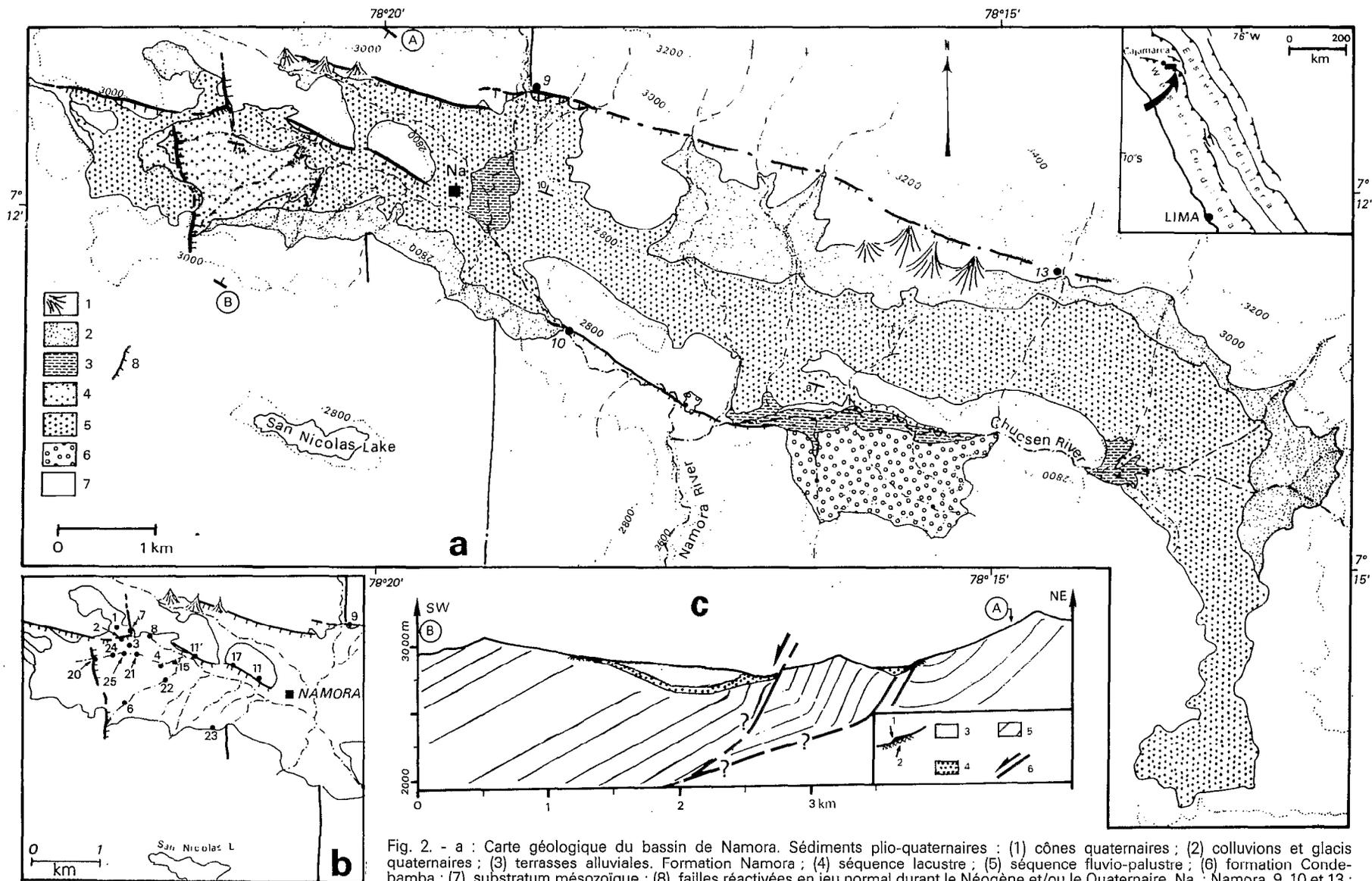


Fig. 2. - a : Carte géologique du bassin de Namora. Sédiments plio-quaternaires : (1) cônes quaternaires ; (2) colluvions et glacis quaternaires ; (3) terrasses alluviales. Formation Namora : (4) séquence lacustre ; (5) séquence fluvio-palustre ; (6) formation Condebamba ; (7) substratum mésozoïque ; (8) failles réactivées en jeu normal durant le Néogène et/ou le Quaternaire. Na : Namora, 9, 10 et 13 : sites de mesures.

b : Localisation des sites microtectoniques à l'ouest du bassin, 1, 2, 3, etc., correspondent dans les tableaux à N1, N2, N3, etc.

c : Coupe géologique schématique A-B du bassin de Namora. (1) cônes alluviaux ; (2) glacis ; (3) séquence lacustre de la formation Namora ; (4) séquence fluviale de la formation Namora ; (5) substratum ; (6) failles majeures.

a : Geological map of the Namora Basin. Plio-Quaternary sediments : (1) Alluvial fans ; (2) Colluvial deposits and pediments ; (3) Alluvial terraces ; (4) Lacustrine sequence ; (5) fluvial and palustrine sequence ; (6) Condebamba Formation ; (7) Mesozoic bedrock ; (8) Neogène and/or Quaternary reactivated normal faults. Na : Namora, 9, 10 and 13 : sites locations.

b : Simplified section A-B of the Namora basin. (1) Alluvial fans ; (2) pediments ; (3) and (4) Distal and proximal sequences of the Namora Formation ; (5) Mesozoic bedrocks ; (6) Major faults.

c : Sketch map of the Western part of the Namora Basin showing location of brittle tectonics observations sites (numbers 1, 2, 3... corresponding to N1, N2, N3... in the tables).

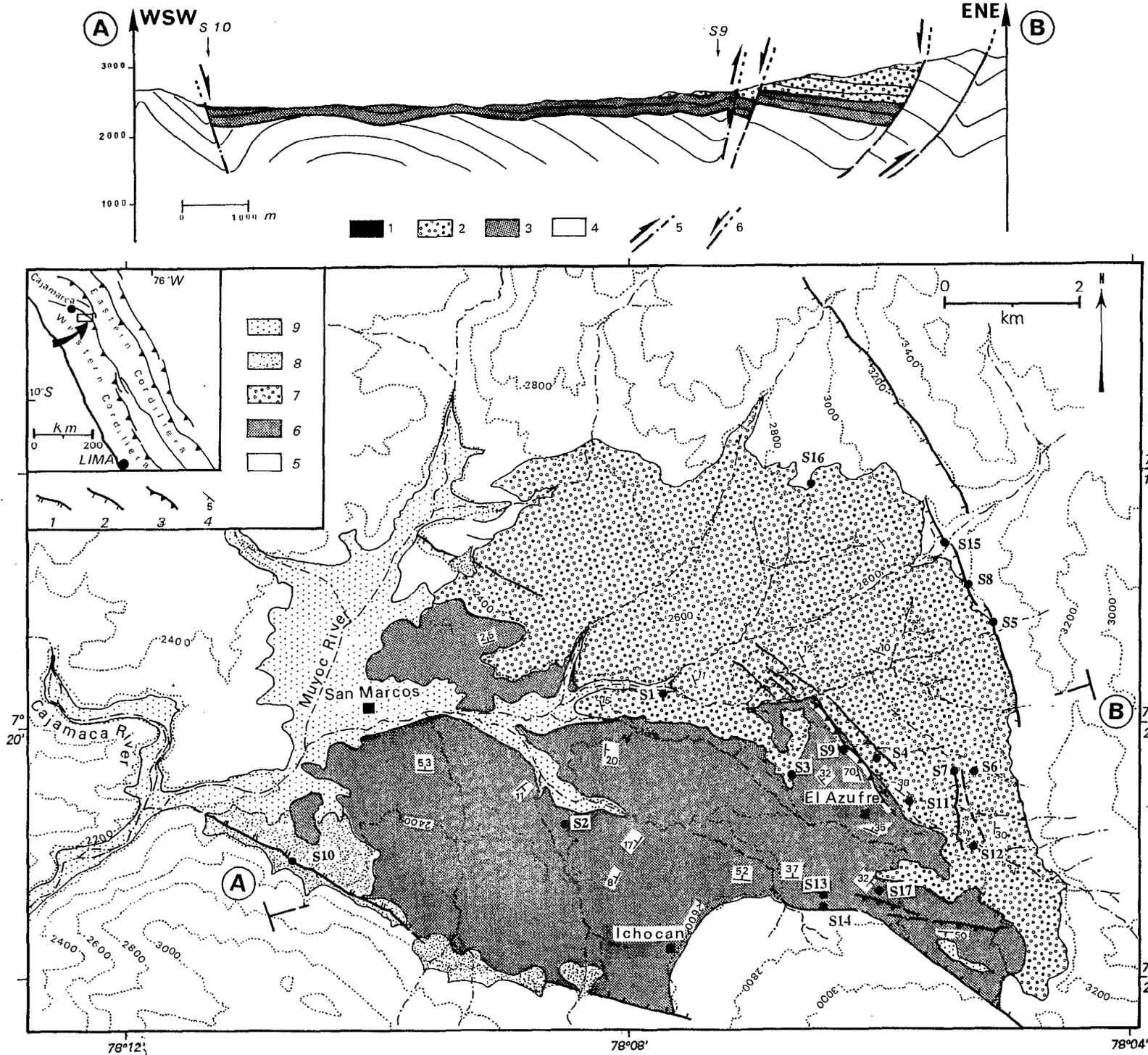


Fig. 3. - Carte géologique du bassin de San Marcos. (1) failles normales quaternaires ; (2) failles normales miocènes ; (3) failles inverses néogènes ; (4) pendages ; (5) substratum mésozoïque ; (6) formation Cajabamba ; (7) formation Condebamba ; (8) cônes-terrasses plio(?) - quaternaires ; (9) terrasses alluviales quaternaires. Localisation des sites d'étude microtectonique S1, S2, S3, etc.

A-B : Coupe géologique schématique du bassin de San Marcos. (1) cônes-terrasses plio(?) - quaternaires ; (2) formation Condebamba ; (3) Formation Cajabamba ; (4) substratum mésozoïques ; (5) failles inverses ; (6) failles normales miocènes et quaternaires.

Geological map of the San Marcos basin. (1) Quaternary normal faults ; (2) Miocene normal faults ; (3) Neogene reverse faults ; (4) Dip ; (5) Mesozoic bedrock ; (6) Cajabamba Formation ; (7) Condebamba Formation ; (8) Plio-Quaternary alluvial fans ; (9) Quaternary alluvial terraces. Location of brittle tectonics observation sites are shown as S1, S2, S3.

A-B : Simplified section A-B of the San Marcos basin. (1) Plio-Quaternary alluvial fans ; (2) Condebamba Formation ; (3) Cajabamba Formation ; (4) Mesozoic bedrock ; (5) Neogene reverse faults ; (6) Miocene and Quaternary normal faults.

l'essentiel du soulèvement apparaît réalisé vers 8-11 Ma (NOBLE *et al.*, 1990 ; MOURIER, 1988). La Cordillère occidentale du Nord Pérou est caractérisée par une importante activité volcanique cénozoïque. L'extinction de l'arc volcanique occidental s'est faite au cours du Miocène supérieur (COBBING *et al.*, 1981 ; NOBLE *et al.*, 1990 ; MOURIER, 1988).

Dans ce contexte, les bassins de Namora, San Marcos et Cajabamba se sont installés, au cours du Miocène, parallèlement aux structures andines préexistantes (fig. 1). Le plus septentrional, le bassin de Namora (fig. 2) est situé dans la déflexion de Cajamarca. Cette déflexion E-W est caractérisée par des trains de plis isopaques, droits ou légèrement déversés et de failles inverses redressées en surface et à pendage généralement sud (REYES, 1980 ; MOURIER, 1988). Dans cette déflexion, le bassin de Namora est bordé au nord par un système de failles d'orientation N100-110° à pendage sud.

Le bassin de San Marcos est situé dans la zone d'inflexion entre les structures E-W de la déflexion de Cajamarca et les écaillés de Marañon orientées N160°. Dans cette partie de la Cordillère les accidents incaïques s'infléchissent suivant une direction NW-SE (fig. 1 et 3). La bordure NE du bassin est marquée par un système de failles d'orientation NW-SE, à pendage SW.

Le bassin de Cajabamba, allongé NNW-SSE, est situé au SE de la déflexion et à l'ouest des accidents des écaillés du Marañon (fig. 1 et 4). Une ancienne surface de chevauchement, borde à l'est la dépression de Cajabamba. Les écaillés du Marañon constituent un système de plis et d'écaillés imbriqués d'orientation NNW-SSE, direction andine caractéristique du Nord Pérou. Ce système d'accidents à vergence NE marque la limite orientale de la Cordillère occidentale (WILSON *et al.*, 1967 ; AUDEBAUD *et al.*, 1973 ; DALMAYRAC *et al.*, 1980 ; JANJOU, 1981 ; MEGARD, 1984).

## LES SÉRIES DE REMPLISSAGE SÉDIMENTAIRE DES BASSINS

Les bassins de Cajabamba et San Marcos sont caractérisés par une sédimentation fluvio-lacustre à fluvio-torrentielle (fig. 5, colonne A). Le remblaiement de ces bassins commence par le dépôt de la formation fluvio-lacustre Cajabamba qui repose en discordance sur les séries plissées du Jurassique supérieur et du Crétacé. Le remplissage devient ensuite fluvio-torrentiel. Il est représenté par une méga-séquence de cône appelée formation Condebamba. Cette dernière affleure également dans la partie SE du bassin de Namora où elle est recouverte par la formation Namora, fluvio-lacustre (fig. 5, colonne B). Les formations Cajabamba et Condebamba décrites initialement par REYES (1980) ont été réunies en un groupe : le groupe San Marcos (MOURIER, 1988).

## Le groupe San Marcos

### LA FORMATION CAJABAMBA

La formation Cajabamba affleure dans les bassins de Cajabamba et San Marcos. Seules les coupes de San Marcos ont été conservées pour l'établissement de la coupe synthétique (fig. 5, colonne A), les dépôts de remplissage du bassin de Cajabamba ayant été largement remobilisés par des glissements gravitaires de grande ampleur. Toutefois les faciès observés et les associations de flores diatomitiques sont parfaitement identiques dans les deux bassins.

La formation Cajabamba est une série de remblaiement fluvio-palustre et lacustre d'une épaisseur maximale de 350 m et de couleur blanchâtre à beige. Sa partie basale est constituée de dépôts conglomératiques et sableux, en bancs peu épais (décimétriques à rarement métriques), alternant avec des niveaux limoneux et argileux. Cette sédimentation fluvio-palustre passe rapidement à des dépôts purement argilo-limoneux, avec quelques intercalations sableuses. La partie médiane de la série est caractérisée par la récurrence de niveaux fluviatiles (conglomérats fins et sables). La partie sommitale de la formation est constituée par des faciès purement lacustres essentiellement argilo-limoneux où s'intercalent des niveaux marno-calcaires et gréseux fins et laminés. Les particularités de cette série sont la présence d'horizons gypseux, de nombreux niveaux ligniteux, des bancs de diatomites pouvant atteindre plus d'un mètre et de matériel volcanique remanié reconnu dans certains faciès gréseux et limoneux.

Le sommet de la formation s'enrichit progressivement en niveaux de micro-conglomérats et de sables remaniant des débris charbonneux et des gastéropodes, intercalés avec des lits argilo-silteux. Cette évolution marque la transgression progressive des niveaux proximaux grossiers de la formation Condebamba. Celle-ci est observée localement en légère discordance angulaire sur la formation Cajabamba. Les discordances angulaires observées n'excèdent jamais 15° et marquent une différence de basculement des couches des formations Cajabamba et Condebamba inclinées vers l'est ou le nord-est.

### LA FORMATION CONDEBAMBA

La formation Condebamba affleure dans les bassins de San Marcos, Cajabamba et Namora où sa puissance maximale est respectivement de 450 à 500 m, 300 à 350 m et 80 m. Elle est caractérisée par une couleur orangée. Elle est constituée à la base de conglomérats parfois en chenaux et à base ravinante, à matrice limoneuse alternant avec des niveaux gréseux et argilo-limoneux. Cette partie basale est organisée en séquences élémentaires, pluri-métriques, de fleuves torrentiels. Elles alternent avec des coulées boueuses surtout bien représentées à Namora. Les

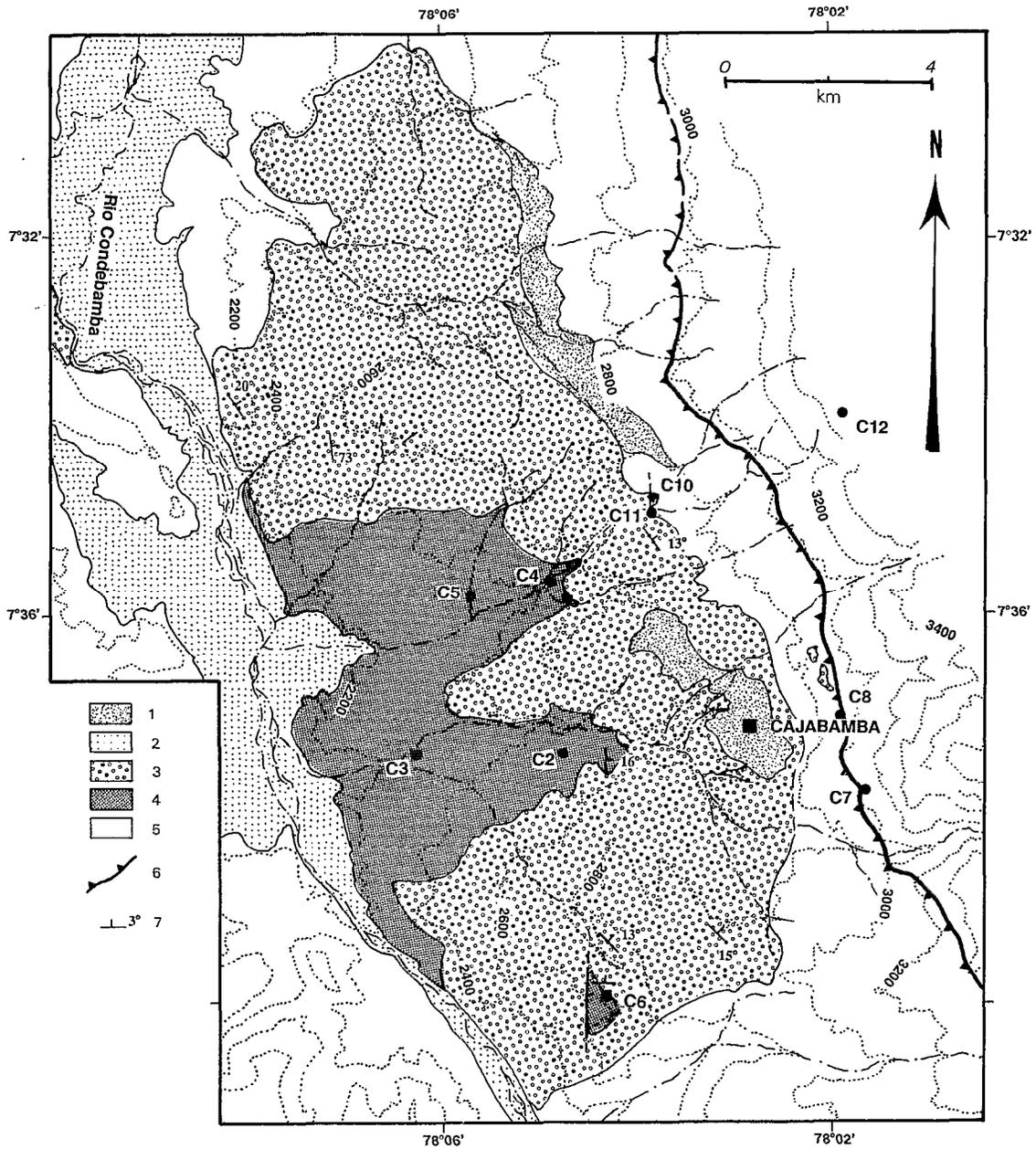


Fig. 4. - Carte géologique du bassin de Cajabamba. (1) dépôts colluviaux plio(?)–quaternaires ; (2) terrasses alluviales quaternaires ; (3) formation Condebamba ; (4) formation Cajabamba ; (5) substratum mésozoïque ; (6) failles inverses appartenant aux écaïlles du Maraïon et réactivées localement en failles normales durant le Miocène ; (7) pendages. Localisation des sites d'étude microtectonique C2, C3, etc.

Geological map of the Cajabamba basin. (1) Plio(?)–Quaternary colluvial deposits ; (2) Quaternary fluvial terraces ; (3) Condebamba Formation ; (4) Cajabamba Formation ; (5) Mesozoic bedrock ; (6) Reverse faults of the Maraïon Thrust and Fold Belt structure reactivated by normal faulting during the Miocene ; (7) Dip. Locations of brittle tectonics observation sites are shown as C2, C3, ...

conglomérats de la base sont principalement à éléments de roches carbonatées.

Progressivement les faciès s'enrichissent en conglomérats de plus en plus grossiers, à éléments jointifs de quartzites, pouvant atteindre le mètre. La mégaséquence est grano-strato-croissante et traduit la progradation, d'est en ouest, de ces faciès proximaux de cônes torrentiels sur les faciès distaux, fluvio-lacustres. Les mesures de courant effectuées sur des imbrications de galets de la base de la formation Condebamba montrent que les zones d'apport sont les reliefs bordant les bassins de Cajabamba et San Marcos vers l'est.

A Namora la formation Condebamba peu représentée, au SE du bassin, témoigne d'une progradation du sud vers le nord. Le contact formation Namora sur formation Condebamba, observé sur un seul affleurement, est caractérisé par une discordance soulignée par un niveau de micro-brèches décimétriques. La valeur angulaire de la discordance étant très faible (5°) et du fait la similarité des faciès de part et d'autre de la discordance celle-ci pourrait ne pas avoir de signification tectonique.

#### AGE DU GROUPE SAN MARCOS

REYES (1980) attribuait la formation Cajabamba au Miocène inférieur et moyen et la formation Condebamba au Plio-Pléistocène. Le remplissage néogène des bassins de Cajabamba et San Marcos est incisé par des canyons pouvant atteindre plus de 250 m de profondeur. Ceci implique que le groupe San Marcos s'est déposé probablement en grande partie pendant le soulèvement andin. Or, le soulèvement andin dans cette région est d'âge miocène inférieur-moyen et il a été réalisé vers 8 à 11 Ma (MOURIER, 1988 ; NOBLE *et al.*, 1990). D'autre part, la formation Cajabamba remanie du matériel volcanique témoin de l'activité volcanique miocène. Il en résulte que l'essentiel du remplissage sédimentaire du groupe San Marcos doit probablement être d'âge miocène inférieur à moyen (anté 8 à 10 Ma).

Les analyses des assemblages de diatomées montrent une flore à caractère archaïque attesté par la présence de formes voisines d'*Aveolophora jouseana* caractérisant le Miocène d'URSS (PROSCHKINA-LAVRENKO *et al.*, 1974) les ayant présenté comme les synonymes de *Melosira jouseana*) et par la présence de très larges spécimens de *Melosira aff. agassizii*. Ces assemblages de diatomites sont compatibles avec un âge miocène inférieur et (ou) moyen pour la formation Cajabamba. La formation Condebamba étant sous-jacente à la formation Namora d'âge tortonien dans le bassin de Namora (voir *infra*), elle est donc probablement d'âge miocène moyen et (ou) supérieur (Tortonien inférieur). L'ensemble des arguments évoqués ici, est en faveur d'un âge miocène inférieur à supérieur pour le groupe San Marcos.

## La formation Namora

#### LITHOLOGIE DE LA FORMATION NAMORA

La formation Namora qui n'affleure que dans le bassin du même nom est une séquence de remplissage fluvio-lacustre d'épaisseur maximale 180 m. Elle est représentée par des faciès fluviaux proximaux (la mégaséquence proximale) bien développés le long de la bordure nord du bassin et des faciès fluvio-lacustres distaux affleurant seulement dans la partie ouest du bassin (la mégaséquence distale : fig. 4). Dans la majeure partie du bassin affleure une série sableuse peu incisée par le réseau hydrographique.

La mégaséquence proximale (50 m) est formée de séquences élémentaires fluviales caractérisées par des conglomérats quartzitiques chenalisés, des niveaux de sables et des horizons argilo-limoneux marquant une influence palustre. La mégaséquence distale (fig. 5, colonne B) est constituée à sa base de séquences élémentaires fluviales passant progressivement à des faciès purement lacustres, avec une récurrence de niveaux fluviaux peu développés dans leur partie médiane. Les faciès lacustres sont représentés par des argiles, des limons et des sables très purs et faiblement consolidés où s'interstratifient des lits carbonneux, un niveau métrique de bancs de tufs dacitiques interstratifiés avec des diatomites, des couches de calcaires lacustres très indurés, des concrétions calcaires vacuolaires à remplissage de calcite cristalline et des meulière.

#### AGE DE LA FORMATION NAMORA

*Arguments paléontologiques sur l'âge de la formation Namora* : une seule espèce de diatomées analysée dans les assemblages collectés dans la partie basale de la séquence lacustre de la formation Namora présente un intérêt stratigraphique. Cette espèce appartient à la famille *Talassisiracea*. Ses caractères paléontologiques montrent qu'elle peut être attribuée à deux genres, *Mesodictyon* ou *Talassiosira*. L'analyse diatomologique montre que dans les deux cas, les spécimens étudiés sont identiques à des spécimens étudiés en Afrique (FOURTANIER, 1987), en Amérique du Nord (KREBS *et al.*, 1988) et en France (SERIEYSOL, communication personnelle) qui sont d'âge miocène supérieur. En conclusion, les arguments paléontologiques indiquent que la formation Namora peut-être attribuée au Miocène supérieur (BELLIER *et al.*, 1989b).

*Arguments radiométriques sur l'âge de la formation Namora* : les analyses radiométriques (K/Ar), qui ont été effectuées sur des biotites de 3 échantillons de tufs dacitiques interstratifiés dans les séries lacustres de la formation Namora, donnent des résultats en accord avec les arguments paléontologiques. Du fait de leur faible teneur en potassium et en argon radio-génique les 3 échantillons donnent des âges légè-

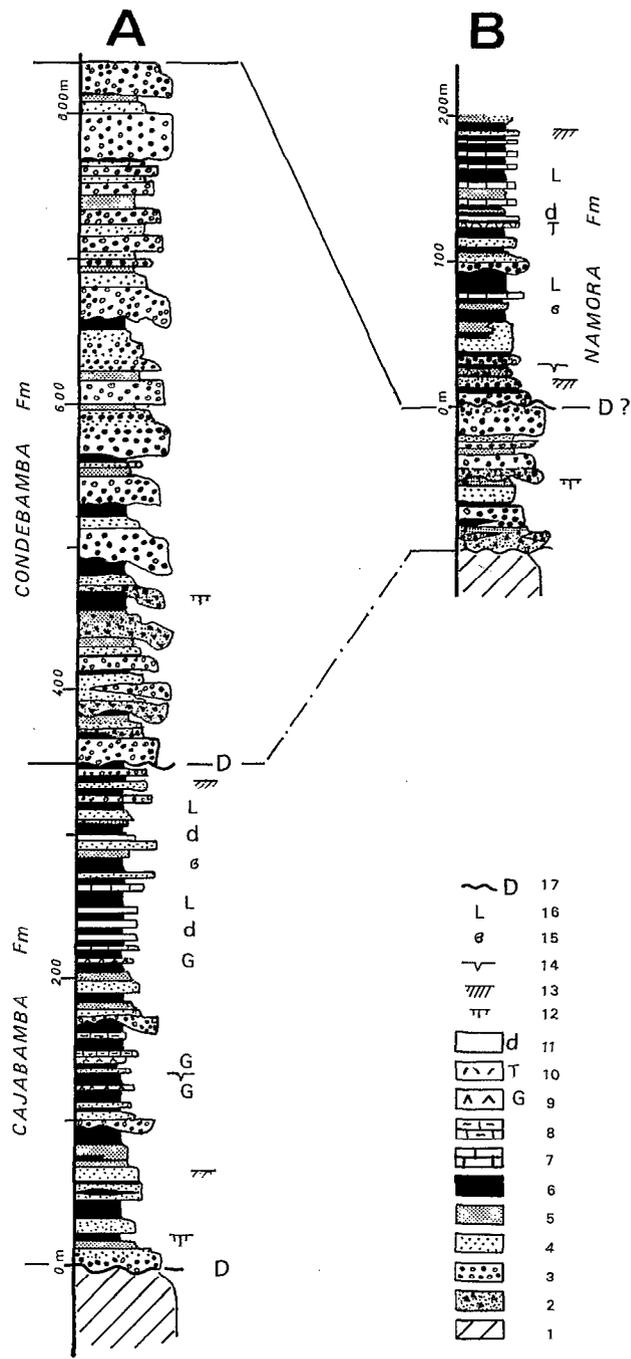


Fig. 5. - Colonnes lithostratigraphiques simplifiées des formations miocènes de remplissage des bassins de San Marcos (A) et de Namora (B). (1) substratum crétaqué; (2) coulées boueuses; (3) conglomérats; (4) sables; (5) silts et limons; (6) argiles et argillites; (7) calcaires lacustres; (8) calcaires marneux; (9) gypse; (10) tufs; (11) diatomites; (12) paléo-sols; (13) stratifications entrecroisées; (14) traces de dessiccation; (15) planorbis et autres fossiles lacustres; (16) niveaux de lignites; (17) discordance.

*Synthetic stratigraphic logs of the Miocene fillings of the San Marcos (A) and Cajabamba (B) basins. (1) Cretaceous bedrock; (2) Mudflows; (3) Conglomerates; (4) Sands; (5) Silts and loams; (6) Shales; (7) Lacustrine limestones; (8) Marly limestones; (9) Gypsum; (10) Tuffs; (11) Diatomites; (12) Paleosols; (13) Cross-beddings; (14) Dessication traces; (15) Planorbis and other lacustrine fossils; (16) Lignite beds; (17) Discordance.*

ment différents. L'âge radiométrique moyen déterminé de  $7,2 \pm 0,6$  Ma permet d'attribuer un âge tortorien supérieur à la partie médiane de la formation Namora.

### Les dépôts plio-quadernaires

Les formations miocènes sont recouvertes par des dépôts continentaux essentiellement alluviaux et colluviaux. Ce sont des terrasses fluviales généralement emboîtées installées le long du réseau hydrographique actuel, des cônes de déjection situés au pied des versants, des tabliers de dépôts alluviaux et colluviaux tapissant les pentes. De belles vallées glaciaires associées à des cordons morainiques de la dernière glaciation sont observés entre 3 600 et 4 000 m d'altitude (BELLIER *et al.*, 1989a). Les dépôts glaciaires et fluvio-glaciaires n'apparaissent qu'à partir de 3 300-3 500 m, ils ne sont donc pas représentés dans les bassins étudiés.

### Environnement tectono-sédimentaire du remplissage miocène

L'ensemble des caractéristiques de la formation Cajabamba en fait une série lacustre déposée dans un bassin confiné à évaporitique probablement endoréique. Or, des assemblages diatomitiques recueillis dans cette formation indiquent plutôt un milieu d'eau douce. Certains échantillons reflètent un milieu marécageux riche en végétaux aquatiques. Les espèces littorales, planctoniques facultatives telles que *Fragilaria construens*, *Fragilaria virescens* et var., *Fragilaria aff. hungarica*, ou les épiphytes (*Amphora ovalis*, *Epithemia argus*, *Epithemia sorex*, *Cocconeis placentula*, *Synedra ulna*, *Cymbella* spp., *Achnanthes exigua*, *Gomphonema intricatum*) constituent la majorité de l'assemblage. D'autres échantillons contiennent de grands *Melosira* (*Aulacosira*) proches de formes actuelles euplanctoniques qui traduisent un milieu lacustre, bien que les espèces bordières associées à d'abondantes spicules d'éponges attestent de la proximité des rivages. La présence d'effondrements essentiellement à vergence W indiquent une paléopente dirigée vers l'ouest. Des convolutés observés dans la formation associés à des discordances progressives intra-formationnelles et à des failles normales synsédimentaires montrent un événement extensif synsédimentaire et une bordure faillée instable à l'est. La présence de matériel volcanique indique une activité volcanique synchrone du remplissage sédimentaire.

Le caractère sédimentaire de la formation Condebamba, drastiquement différent de celui de la formation Cajabamba, indiquerait un changement climatique important ayant lieu durant le début du dépôt de la formation Condebamba dont l'aspect torrentiel témoignerait d'une forte humidification du climat. D'autre part, le caractère catastrophique de la sédimentation au sommet de la formation Condebamba

marque probablement la fermeture des bassins de San Marcos et de Cajabamba associée à un des épisodes compressifs miocène (Quechua). Dans le bassin de Namora la formation Condebamba montre une progradation sédimentaire qui s'effectue du sud vers le nord, la zone d'apport étant située au sud du bassin de Namora. La progradation durant les dépôts de la formation Namora s'effectue au contraire du nord vers le sud, la zone d'apport étant la bordure septentrionale du bassin. Cette constatation, associée au fait qu'il n'existe pas de formation Namora dans les bassins méridionaux, montre que la période entre les dépôts de la formation Namora et de la formation Condebamba marque un changement géodynamique important probablement lié à un des événements tectoniques Quechua.

La flore des échantillons de diatomites analysés dans la partie basale des sédiments lacustres de la formation Namora témoigne d'un milieu palustre, aux eaux très diluées, légèrement acides. Les formes dominantes sont *Synedra ulna*, épiphyte, ou *Fragilaria virescens*, planctonique facultative. La très faible minéralisation des eaux est attestée par l'abondance relative de *Fragilaria virescens*, *Melosira* et *Eunotia* spp. Ces deux derniers taxons, qui préfèrent les eaux acides, sont communs dans les tourbières. Nous noterons une faible dissymétrie du bassin avec un axe du dépôt-centre décalé au nord et une subsidence relative plus marquée vers la bordure septentrionale du bassin (fig. 2, coupe). Le caractère grano-strato-décroissant de la série de remplissage du bassin de Namora témoigne du comblement d'une dépression faiblement subsidente dans un contexte tectonique relativement calme. Toutefois, des failles synsédimentaires normales et les faciès proximaux grossiers concentrés le long de la bordure nord et la légère dissymétrie du bassin montrent que le bassin de Namora s'est mis en place lors d'une phase d'extension ayant fait jouer des failles limitant le bassin au nord. Les dépôts de remplissage du bassin de Namora sont peu creusés par le réseau hydrographique actuel, les canyons n'excédant jamais 15 à 20 m ce qui implique que le soulèvement andin est probablement réalisé après la fin de la sédimentation dans le bassin de Namora.

### Taux de sédimentation du remplissage miocène

Les âges de ces formations n'étant que partiellement contraints, nous allons calculer un taux de sédimentation minimum et maximum des bassins durant le Néogène. Nous avons introduit un taux de décompaction des sédiments afin de définir une vitesse de sédimentation plus proche de la réalité. Les coefficients de décompaction retenus sont de 1,5 pour les séries argilo-sableuses (formations Cajabamba et Namora) et de 1 pour les séries grésos-conglomératiques (formation Condebamba). Actuellement, les épaisseurs sédimentaires sont approximativement de

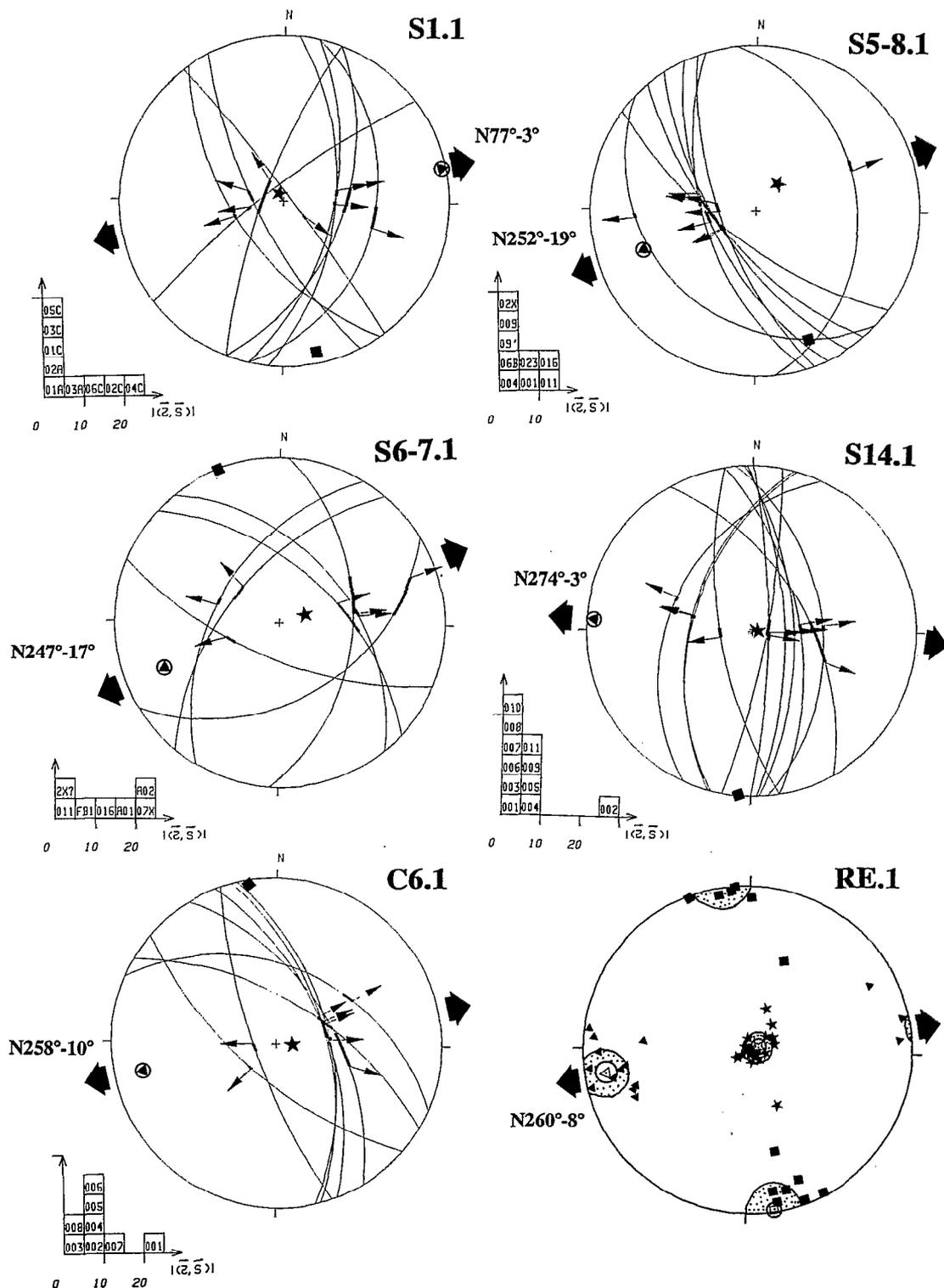


Fig. 6. - Exemples de données de failles normales utilisées pour calculer les tenseurs déviatoriques de contraintes de la phase d'extension ENE-WSW d'âge Miocène (phase 1, tabl. I). Projection sur diagramme de Wulf, hémisphère inférieur. Les écarts entre la strie mesurée (s) et la strie calculée (t) sont représentés par un trait épais sur la trace du plan de faille et par les histogrammes. Les chiffres associés à chaque diagramme (en haut et à droite) sont le numéro des sites (premier chiffre) et le numéro de la phase (deuxième chiffre). Localisation des sites : voir figures 2, 3 et 4. Les axes des tenseurs sont représentés comme suit :  $\sigma_1$  : étoile ;  $\sigma_2$  : carré ;  $\sigma_3$  : triangle dans cercle. Les larges flèches noires à l'extérieur des diagrammes représentent l'azimuth de l'axe minimum des contraintes ( $\sigma_3$ ). RE.1 : directions des axes principaux des contraintes de tous les sites analysés de la phase d'extension ENE-WSW. Les surfaces pointillées représentent les cônes de confiance de Fisher (à 95 % de confiance) et les étoiles, carrés et triangles blancs dans les cercles représentent les axes des cônes de Fisher.

Exemples of normal fault data related to the Miocene ENE-WSW trending extensional tectonics, used to compute the deviatoric stress tensor (phase 1, table I). Wulf's stereonet projection, lower hemisphere. Differences between measured (s) and calculated (t) slip vectors are shown as thick lines on the fault planes and in the histograms. Numbers given to each diagram (upper right) show field site numbers (first number) and phase numbers (second number). For site locations refer to figures 2, 3 and 4. Tensor axis are shown as follows :  $\sigma_1$  : stars ;  $\sigma_2$  : squares ;  $\sigma_3$  : triangles in circle. Large black arrows outside of the diagrams represent the axis of the minimum principal stress direction ( $\sigma_3$ ). RE.1 : Directions of all principal tensor axis for all analyzed sites related to the ENE-WSW trending extensions. Dotted areas correspond to the 95% confidence cones of Fisher ; open stars, squares and triangles in circles refer to the axis of Fisher's cones.

TABLEAU I

Résultats de l'analyse numérique (méthode d'inversion de CAREY, 1979) des populations de failles striées pour l'état de contraintes d'extension ENE-WSW (.1)  
 Results of numerical analysis (inversion method of CAREY, 1979) of normal faults related to roughly ENE-WSW trending Miocene extension tectonics (.1)

Site	ND	Lat. S	Long. W	$\sigma_1$		$\sigma_2$		$\sigma_3$		R	D
				Azim.	Incl.	Azim.	Incl.	Azim.	Incl.		
<b>NAMORA</b>											
N1	18	7°11'10	78°21'20	051°	74°	169°	08°	261°	14°	0.87	uM
N7	16	7°11'12	78°21'14	251°	86°	354°	01°	084°	04°	0.82	"
N2	11	7°11'16	78°21'20	255°	80°	151°	02°	061°	10°	0.58	"
N24	10	7°11'30	78°21'30	127°	82°	359°	05°	269°	06°	0.83	"
N4	14	7°11'34	78°20'54	357°	82°	164°	08°	255°	02°	0.87	"
N22	09	7°11'45	78°20'50	062°	72°	158°	02°	249°	17°	0.60	"
<b>SAN MARCOS</b>											
S16	10	7°18'07	78°06'38	126°	87°	353°	02°	263°	02°	0.50	M
S5-8	09	7°19'08	78°05'07	039°	67°	158°	11°	252°	19°	0.65	Mz
S1	09	7°19'45	78°08'45	315°	85°	168°	04°	077°	03°	0.90	M
S6-7	07	7°20'15	78°05'15	068°	73°	337°	0.2°	247°	17°	0.42	"
S9	07	7°20'15	78°06'15	045°	88°	187°	01°	277°	01°	0.41	"
S3	09	7°20'23	78°06'37	152°	49°	020°	31°	274°	25°	0.93	"
S14	11	7°21'22	78°06'30	085°	87°	184°	0.5°	274°	03°	0.80	"
<b>CAJABAMBA</b>											
C4	04	7°35'40	78°04'	-----		-----		E-W			M
C7-8	10	7°37'45	78°01'45	021°	58°	164°	26°	262°	16°	0.28	Mz
C6	08	7°40'00	78°04'14	094°	79°	348°	03°	258°	10°	0.80	M
RE.1		7°20'	78°10'	063° ± 10°	83°	170° ± 10°	02°	260° ± 9°	08°	0.68	

Paramètres des tenseurs déviatoriques  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  et  $\sigma_3$  : direction et plongement des axes principaux des contraintes en degrés ;  $R = \sigma_2 - \sigma_1 / \sigma_3 - \sigma_1$  : rapport des contraintes déviatoriques. Sa valeur varie entre 0 ( $\sigma_2 = \sigma_1$ ) ( $\sigma_2 = \sigma_3$ ) et 1.

Site : numéro du site : N1, N2, ... sites du bassin de Namora (fig. 2) ; S1, S2, ... sites du bassin de San Marcos (fig. 3) ; C1, C2, ... sites du bassin de Cajabamba (fig. 4) ; lorsque 2 chiffres sont reliés par un trait d'union (e.g. S5-8), les données de deux sites proches (e.g. sites S5 et S8) sont associées pour le calcul.

ND : nombre de données et D : âge des formations, Mz : Mésozoïque, uM : Miocène supérieur, M : Miocène, Q : Quaternaire et H : Holocène.

RE.1 : paramètres du tenseur déviatorique régional défini en utilisant la méthode statistique de Fisher.

Computed deviatoric stress parameters :  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  et  $\sigma_3$  : azimuth and dip of the principal stress axes ; azimuths are measured clockwise from North and dips are measured toward the measured azimuth ;  $R = \sigma_2 - \sigma_1 / \sigma_3 - \sigma_1$  is the « ratio » of the stress tensors. Its value varies between 0 ( $\sigma_2 = \sigma_1$ ) ( $\sigma_2 = \sigma_3$ ) and 1. Site numbers : N1, N2, ... are sites from the Namora basin sites and located in figure 2 ; S1, S2, ... are sites from the San Marcos basin sites located in figure 3 ; C1, C2, ... are sites from the Cajabamba basin sites located in figure 4.

ND is the number of striated fault planes used to compute the solutions and D the age of the formation : Mz : Mesozoic, uM : upper Miocene, M : Miocene, Q : Quaternaire and H : Holocene. RE.1 : regional stress tensor according to Fisher's statistical method.

350 m, 500 m et 200 m pour les formations Cajabamba, Condebamba et Namora. Nous aurions des épaisseurs sédimentaires avant diagenèse de 525, 500 et 300 m, respectivement pour les formations Cajabamba, Condebamba et Namora. La colonne sédimentaire représentant le groupe San Marcos après décompaction est de 1 025 m. Les temps de dépôts couvrent au maximum le Miocène inférieur et moyen ( $T_{\max.} = 13$  Ma) et au minimum le Miocène moyen ( $T_{\min.} = 7$  Ma), les taux de sédimentations minimum et maximum sont respectivement de 0,08 et 0,14 mm/an. Les 300 m de la colonne sédimentaire décompactée de la formation Namora se sont déposés durant le Miocène supérieur ( $T_{\max.} = 5,9$  Ma) ou entre les épisodes Quechua 2 et Quechua 3 d'âge approximatif 10 et 7 Ma ( $T_{\min.} = 3$  Ma). Les taux de sédimentation qui en résultent sont de 0,05 à 0,1 mm/an. Ces vitesses de sédimentation moyenne de l'ordre de 0,1 mm/an modérées et bien inférieures aux vitesses de 0,5 à 1 mm/an, enregistrées dans certains *pull-aparts* et certains grabens tectoniquement très actifs. Par ailleurs, la subsidence relative miocène des bassins déduite de l'étude de la sédimentation est discontinue. Cette discontinuité est marquée par des discordances (d'érosion et angulaires) et par la récurrence de niveaux conglomératiques ravinants interrompant la sédimentation lacustre des formations Cajabamba et Namora. La vitesse moyenne de sédimentation de 0,1 mm/an durant le dépôt du groupe San Marcos intègre donc des vitesses incrémentales plus rapides, notamment lors du dépôt de la formation Condebamba. Le remplissage du bassin de Namora se réalise dans une dépression encore plus faiblement subsidente impliquant une activité faible.

## LES RÉGIMES TECTONIQUES NÉOGÈNES ET QUATÉNAIRES

La cinématique des failles est définie ici en utilisant les stries sur les plans de faille. L'analyse de ces cinématiques de faille en terme de contraintes suppose que le vecteur glissement souligné par les stries s'effectue dans la direction de la contrainte tangentielle résolue sur chaque plan de fracture pré-existant (CAREY et BRUNIER, 1974). Un tenseur déviatorique des contraintes, qui explique le mieux les mouvements observés, peut alors être calculé par inversion des plans striés (CAREY, 1979). Ce traitement nécessite une première étape de séparation des familles de stries, basée sur l'analyse des déformations mais surtout sur la chronologie relative des stries de différente génération observées sur un même plan. Cette chronologie relative est établie en étudiant en détail les relations entre les stries.

Dans le substratum crétacé, des plans de faille portant des stries inverses et décrochantes correspondant aux déformations paléogènes (C12, C11, C7 ;

tabl. III) sont affectées postérieurement par des stries de cinématiques néogènes et quaternaires. L'analyse de ces cinématiques de faille et des déformations cassantes qui leur sont associées a permis de mettre en évidence 5 états de contraintes néogènes et quaternaires successifs :

- deux extensions de direction ENE-WSW et NE-SW ;
- deux compressions de direction de raccourcissement respectivement WNW-ESE, pour la première et N-S, pour la deuxième ;
- et une extension N-S encore active.

### Les extensions ENE-WSW et NE-SW

Au cours de cette première période d'extension caractérisée par deux directions d'extension ENE-WSW (sites .1, RE.1 : fig. 6 et tabl. I) et NE-SW (sites .2, RE.2 : fig. 7 et tabl. II), l'extension ENE-WSW est prédominante, alors que l'extension NE-SW n'est représentée que sur 7 sites dans les bassins de San Marcos (S5, S6, S7, S8, S15) et Cajabamba (C2, C3). Les failles bordières du bassin de San Marcos (S5, S8, S15), Cajabamba (C7) et Namora (N11, N17 : BELLIER *et al.*, 1989b) affectent des grès quartzeux crétacés. Les stries correspondant à l'extension ENE-WSW sont des stries mécaniques affectant une fine gouge blanche quartzreuse (S5 et S8) ou de fines stries de frictions associées à de grands miroirs polis (C7).

La cinématique de ces failles bordières est normale-dextre (*pitch* 80°N) sur les portions de failles NW-SE à NNW-SSE et normale pure à normale-séneestre sur les portions N-S. Les failles bordières du bassin de Namora d'orientation N100-110° montrent une cinématique normale-dextre (BELLIER *et al.*, 1989b). Cette cinématique des failles bordières est en accord avec une direction d'extension E-W à ENE-WSW. Les discordances (intraformationnelles et formations Cajabamba/Condebamba) observées sont toujours la conséquence d'un basculement des couches vers l'E-NE, c'est-à-dire vers les failles bordières majeures. Elles sont interprétées comme le résultat d'un basculement sur des failles normales régionales, légèrement incurvées.

L'extension ENE-WSW est représentée par des failles normales synsédimentaires dans les formations Cajabamba (exemples sites S14 et C5 ; photo 1) et Namora (N1 et N4 : BELLIER *et al.*, 1989b). Ces failles synsédimentaires ont des rejets verticaux décimétriques à métriques. Dans les blocs affaissés, il s'est développé localement des accumulations de micro-brèches et de micro-conglomérats adjacentes aux plans de faille synsédimentaire. Ces derniers s'amortissent vers le haut dans les séries sableuses ou sont cachetés par des niveaux argilo-limoneux ou sableux intra-formationnels. Cette cinématique se manifeste aussi par des failles métriques qui affectent le socle (S5, S8, S16, C7 et C8) aussi bien que les formations Cajabamba (S3, S14, C4, C6), Condebamba (S1, S6, S7) et Namora (N2, N4, N22 et N24). Au nord du

TABLEAU II

Résultats de l'analyse numérique des populations de failles striées pour l'état de contraintes d'extension NE-SW (.2)  
*Results of the numerical analysis of normal faults related to the Miocene NE-SW trending extensional tectonics (.2)*

Site	ND	Lat. S	Long. W	$\sigma_1$ Azim. Incl.	$\sigma_2$ Azim. Incl.	$\sigma_3$ Azim. Incl.	R	D
<b>SAN MARCOS</b>								
S15	09	7°18'30	78°05'30	094° 83°	307° 06°	217° 04°	0.65	Mz
S5-8	10	7°19'08	78°05'07	219° 72°	312° 0.7°	041° 18°	0.84	Mz
S6-7	07	7°20'15	78°05'30	007° 84°	125° 02°	215° 05°	0.52	M
<b>CAJABAMBA</b>								
C2-3	07	7°37'24	78°04'45	315° 32°	164° 54°	054° 14°	0.38	M
RE.2		7°20'	78°10'	300° 81°	308° 02°	042° 06°	0.60	

RE.2 : paramètres du tenseur déviatorique régional défini en utilisant la méthode statistique de Fisher. Mêmes légendes que dans le tableau I.

*RE.2 : regional stress tensor parameters according to Fisher's statistical method. Same captions as in table I.*

TABLEAU III

Résultats de l'analyse numérique des populations de failles striées pour l'état de contraintes de la compression WNW-ESE (.3)  
*Results of numerical analysis of reverse and strike-slip faults related to the WNW-ESE trending compressional tectonics (.3)*

Site	ND	Lat. S	Long. W	$\sigma_1$ Azim. Incl.	$\sigma_2$ Azim. Incl.	$\sigma_3$ Azim. Incl.	R	D
<b>NAMORA</b>								
N11	02	7°11'30	78°21'30	-- EW --	----	----	----	Mz
N25	04	"	"	291° 15°	201° 02°	110° 74°	0.71	uM
<b>SAN MARCOS</b>								
S6	02	7°20'15	78°05'15	-- EW --	----	----	----	M
S9	10	7°20'15	78°06'15	112° 04°	022° 09°	229° 80°	0.83	"
S3	18	7°20'23	78°06'37	303° 09°	036° 15°	182° 73°	0.89	"
S11	09	7°20'32	78°05'45	281° 23°	191° 03°	101° 67°	0.78	"
S2	11	7°20'45	78°08'30	271° 02°	180° 39°	003° 51°	0.88	"
S17	10	7°21'15	78°06'00	254° 25°	126° 52°	358° 26°	0.85	"
<b>CAJABAMBA</b>								
C12*	08	7°33'30	78°01'45	230° 01°	138° 59°	320° 31°	0.87	Mz
C10	04	7°34'45	78°03'52	-- EW --	----	----	----	Mz
C11*	07	7°34'55	78°03'50	220° 29°	021° 59°	125° 08°	0.63	"
C8	08	7°37'00	78°01'53	301° 08°	033° 15°	183° 73°	0.48	"
C7*	17	7°37'00	78°01'53	084° 09°	347° 40°	184° 49°	0.66	"
RE.3		7°20'0	78°10'	285° ± 23° 10°	021° ± 35° 00°	047° ± 33° 86°	0.78	

RE.3 : paramètres du tenseur déviatorique régional défini en utilisant la méthode statistique de Fisher. Mêmes légendes que dans le tableau I. Les sites dont les numéros sont complétés par un astérisque sont des sites de failles liées à une compression antérieure au remplissage miocène des bassins ; ces sites n'ont donc pas été utilisés pour calculer RE.3.

*RE.3 : regional stress tensor parameters according to Fisher's statistical method. Same captions as in table I. Sites with numbers completed by an asterisk are sites related to compressional tectonics pre-dating the Mesozoic basin filling ; they have been omitted in the calculation of RE.3.*

village d'El Azufre (près du site S9) des failles normales hectométriques d'orientation NNW-SSE et à pendage W découpent la couverture Condebamba en gradins. Une faille normale d'échelle plus modeste est observée en aval (S1). Sa cinématique normale avec une légère composante dextre est en accord avec une extension ENE-WSW. Les vecteurs glissement de la phase d'extension ENE-WSW sont représentés par des stries mécaniques fines ou plus rarement des stries stylolitiques affectant les galets carbonatés de la formation Condebamba.

Les inversions de ces vecteurs glissement donnent un état de contraintes en extension dont la direction de traction ( $\sigma_3$ ) est comprise entre N061°E et N097°E (RE.1 : fig. 6 et tabl. I). Le tenseur régional des contraintes défini statistiquement, en utilisant la méthode de Fisher (modifié par WATSON, 1960) à partir des 15 tenseurs locaux, donne un état de contraintes moyen en extension (RE.1 : fig. 6 et tabl. I) caractérisé par des axes  $\sigma_3$  et  $\sigma_2$  horizontaux orientés respectivement N260° et N170° et un axe  $\sigma_1$  vertical. La moyenne arithmétique des valeurs des rapports R donne un rapport moyen de 0,68 définissant un tenseur triaxial.

L'épisode d'extension NE-SW (sites .2, RE.2, fig. 7 et tabl. II) est représenté sur les failles bordières du bassin de San Marcos par une cinématique de faille normale-sénestre marquée par de fines stries mécaniques et de larges cannelures décimétriques (S15). Nous n'avons pas observé cette cinématique sur la faille bordière du bassin de Cajabamba. L'ensemble des sites tectoniques montrant cet épisode est constitué de failles striées, d'échelle métrique, affectant les formations Cajabamba (C2 et C3) et Condebamba (S6 et S7). L'analyse numérique des plans de faille striés donne un état de contraintes régional en extension (RE.2 : fig. 7 et tabl. II), caractérisé par une direction de traction proche de NE-SW ( $\sigma_3$  : N42°) et un axe  $\sigma_1$  vertical.

Aux sites S5, S6, S7 et S8 ont été enregistrées, à la fois, les extensions ENE-WSW et NE-SW, ce qui implique que ces extensions sont bien deux états de contrainte distincts. La majorité des calculs définissant les états de contraintes extensifs (ENE-WSW et NE-SW) est bien contraint et les solutions sont stables et de bonne qualité (voir histogrammes des écarts (t,s)).

### Les épisodes compressifs

Les grandes structures incaïques ne montrent pas d'évidence de rejeux lors des épisodes compressifs fini-cénozoïques. Toutefois les failles bordières des bassins néogènes sont marquées localement par de fines stries décrochantes-inverses (sites 9 et 11 : BELLIER *et al.*, 1989b). Ces deux compressions sont marquées dans les bassins de San Marcos et Cajabamba par des failles kilométriques et hectométriques (fig. 3 et 4). Notamment dans le bassin de San Marcos, à proximité d'El Azufre, deux failles à composante inverse d'orientation NW-SE (à proximité de S9,

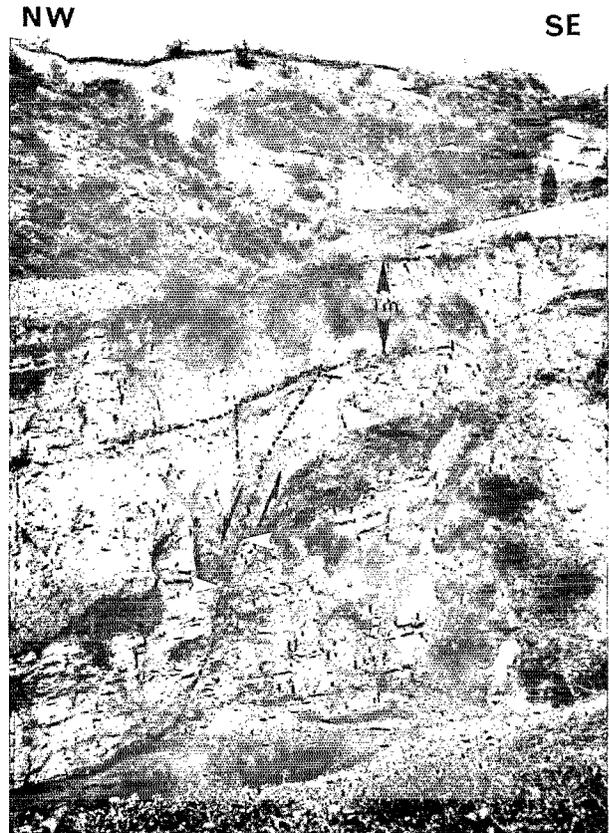


PHOTO 1. — Faille normale synsédimentaire affectant la formation Cajabamba miocène. *Synsedimentary normal fault affecting the Miocene Cajabamba Formation.*

fig. 3) et WNW-ESE (au sud de S17) guident l'écoulement de rivières et sont le siège de phénomènes hydrothermaux importants (vapeurs sulfureuses et sources d'eau chaude). Ces accidents sont soulignés par des verticalisations importantes des couches de la formation Cajabamba qui sont même légèrement renversées au nord d'El Azufre (photo 2). Au NE de cette même faille la stratification du Condebamba est inclinée d'environ 40° vers le NE montrant ainsi une forte flexuration de ces couches à proximité de la faille. Le plan de faille majeur proprement dit n'a pas été observé car il est sous le lit majeur actuel du torrent El Azufre. Le site S9 constitue une compilation de données collectées aux alentours de la faille.

Les deux épisodes compressifs mis en évidence sont représentés par des plis métriques et décamétriques, parfois faillés et déversés affectant les formations Cajabamba et Namora. Ceux-ci ont généralement des axes orientés E-W, mais leur direction peut varier considérablement. La stratification des formations Cajabamba et Namora montre une flexuration régionale de celles-ci décrivant des plis amples. A Namora des fentes en échelon affectent la surface structurale

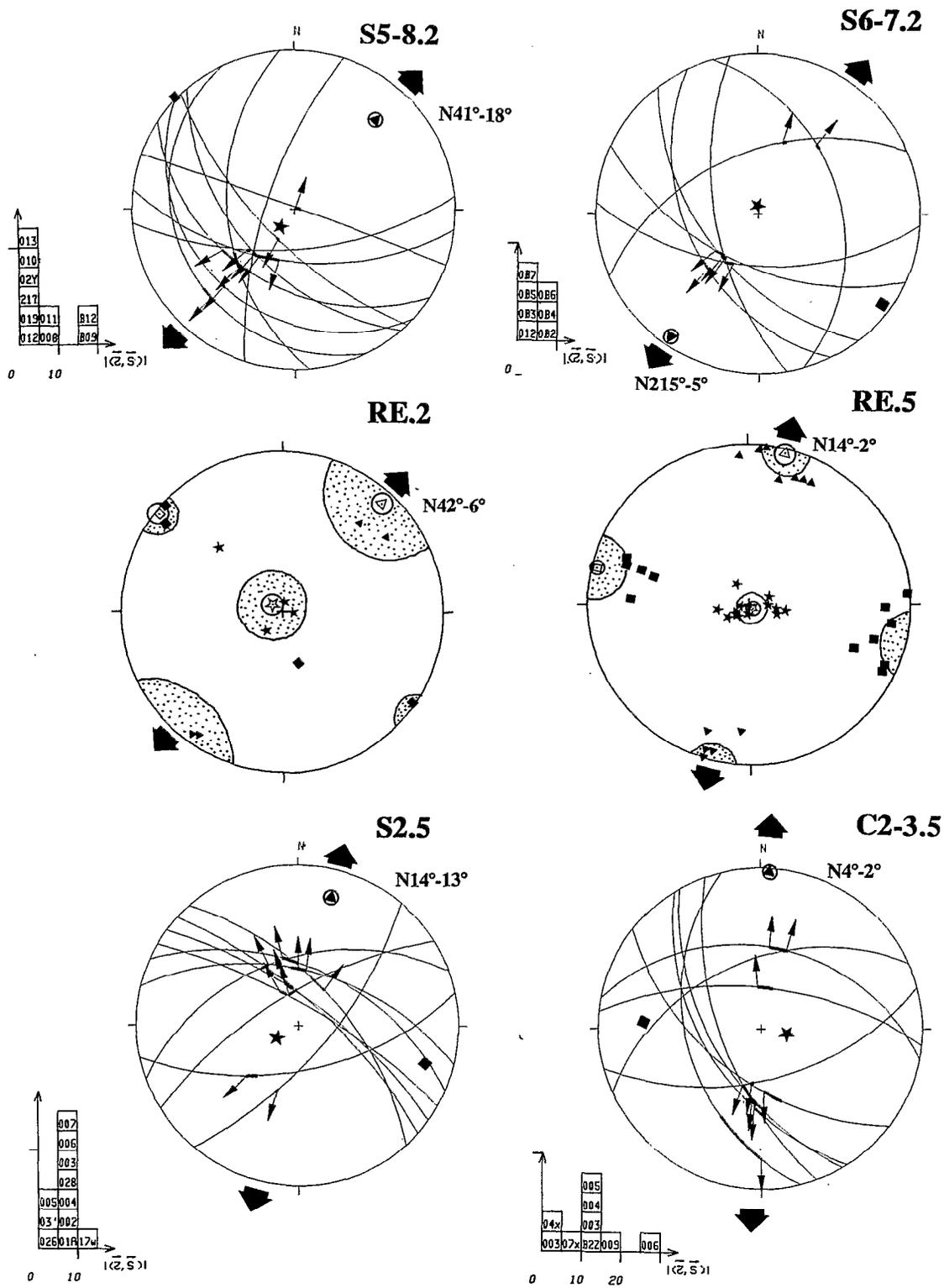


Fig. 7. - Exemples de données de failles normales de la phase d'extension NE-SW d'âge miocène (.2) (diagrammes S5-8.2 et S6-7.2 ; tabl. II) et de la phase d'extension N-S d'âge quaternaire (.5) (diagrammes S2.5 et C2-3.5 ; tabl. V). RE.2 et RE.5 représentent respectivement les directions des axes principaux des contraintes de tous les sites analysés pour les phases d'extension NE-SW (.2) et N-S (.5). Mêmes légendes que pour la figure 6.

Normal fault measurements related to the Miocene NE-SW trending extensional tectonics (.2) (diagrams S5-8.2 and S6-7.2 ; table II) and to the Quaternary N-S trending extensional tectonics (.5) (diagrams S2.5 and C2-3.5 ; table V). RE.1 and RE.5 : Computed principal stress directions of all analyzed sites, related to the NE-SW (.2) and to the N-S trending extensions (.5). Same symbols as in figure 6.

des calcaires lacustres de la formation Namora indiquant une compression de direction proche de N-S (BELLIER *et al.*, 1989b).

Des failles métriques montrent des cinématiques associées à ces compressions. Elles affectent le socle (C8) aussi bien que les formations Cajabamba (S2, S3, S1, S17), Condebamba (S4, S11, S12, C10) et Namora (sites 3, 24, 25 et fig. 2 : BELLIER *et al.*, 1989b). Seulement 4 stries compatibles avec une cinématique de compression E-W ont été observées en un seul site dans la formation Namora (N25, tabl. III). Les sites de mesures dans le Condebamba sont le plus souvent des sites à galets striés localisés à proximité de grandes failles. Les tectoglyphes représentant les compressions sont des stries mécaniques souvent marquées sur une fine gouge argileuse associées à des zones polies, de petits escaliers d'arrachement et des stries stylolitiques affectant les galets carbonatés de la formation Condebamba.

Les inversions des vecteurs glissement caractérisant la première compression donnent une direction ( $\sigma_1$ ) comprise entre N074° et N123° (RE.3 : fig. 8 et tabl. III). Les inversions ne sont pas toujours de bonne qualité (voir histogramme des écarts (t,s) du site S2 et inclinaison des axes aux sites S2 et S17), toutefois la direction de raccourcissement semble relativement bien définie. La mauvaise qualité du calcul S2 (fig. 8) est en accord avec une hétérogénéité de la déformation associée à la compression WNW-ESE. L'analyse statistique de Fisher appliquée sur les 6 tenseurs locaux donne un état de contraintes moyen en compression (RE.3 : fig. 8 et tabl. III) caractérisé par des axes  $\sigma_1$  et  $\sigma_2$  horizontaux orientés respectivement N285° et N021° et un axe  $\sigma_3$  subvertical. La moyenne arithmétique des valeurs des rapports R donne un rapport moyen de 0,78 définissant un tenseur triaxial. L'axe  $\sigma_2$  étant extensif nous définissons donc un régime compressif décrochant associé à une direction de compression ENE-WSW.

Le deuxième état de contraintes compressif est caractérisé par une direction de compression ( $\sigma_1$ ) comprise entre N351° et N026° (RE.4 : fig. 9 et tabl. IV). La majorité des tenseurs ont un axe  $\sigma_1$  horizontal orienté N-S (N000-N010°). Au site C10 le champ de contraintes semble fortement réorienté puisque l'inversion des données conduit à un tenseur caractérisé par une direction de compression orientée N233°. Or, la chronologie relative des stries montre que cette déformation affectant le Condebamba est bien liée à la compression N-S, car elle est postérieure à une cinématique décrochante-inverse en accord avec la compression E-W. Les histogrammes des écarts (t,s) montrent que les inversions sont toutes de bonne qualité et les solutions obtenues sont stables. La forte inclinaison des axes  $\sigma_2$  et  $\sigma_3$  souvent associée à des rapports R proches de 0,9, indiquant des valeurs propres de  $\sigma_2$  et  $\sigma_3$  très proches, montre néanmoins une hétérogénéité de la déformation associée à la compression N-S. Cette inclinaison des axes  $\sigma_2$  et  $\sigma_3$  et leur alternance en position horizontale est caracté-

ristique des tenseurs déviatoriques des contraintes, calculés pour des régimes décrochants. La direction de compression est toutefois parfaitement contrainte du fait de la faible dispersion des axes  $\sigma_1$ . La méthode statistique de Fisher définit une direction de compression moyenne ( $\sigma_1$  moyen) de N010° (RE.4 : fig. 9 et tabl. IV).

## L'extension N-S

La dernière période d'extension est caractérisée par une direction d'extension proche de N-S. Les plans de failles qui constituèrent les bordures actives des bassins de San Marcos et Cajabamba pendant le Miocène, ne portent pas de traces d'une cinématique compatible avec cette extension N-S. Les bordures septentrionales du bassin de Namora montrent en revanche de telles cinématiques (N9 et N11 : BELLIER *et al.*, 1989b).

Au sud, le bassin de San Marcos est limité par un grand escarpement orienté WNW-ESE à regard nord, de 300 m de haut. Il marque le passage d'une faille qui met en contact des calcaires créacés avec des dépôts de cônes plio-quadernaires anciens (?) et la formation Cajabamba (fig. 3 : S10). Dans sa partie occidentale, cet escarpement a été réactivé récemment. Cette réactivation est marquée par un *scarplet* de 15 m de haut qui affecte le cône-terrasse. Ce *scarplet* à pendage nord décale la surface du cône en mouvement normal. Il se prolonge dans les dépôts conglomératiques du cône par un plan de faille de direction N110° et de pendage 75°N. Le miroir de faille scellé par une cimentation carbonatée n'a pu être dégagé mais les galets situés dans son voisinage sont striés et cisailés en jeu normal. Les vecteurs glissement analysés montrent une grande dispersion qui correspond à une hétérogénéité de la déformation liée sans doute à des phénomènes gravitaires. Toutefois bon nombre de stries sont stylolitiques et donc associées à des phénomènes de dissolution-recristallisation. Ceci prouve qu'une partie de la déformation en faille normale s'est déroulée par glissement tectonique lent (*creeping*) pendant le Quaternaire.

Les sites de failles normales montrant une cinématique compatible avec l'extension N-S sont nombreux dans le bassin de Namora et affectent le substratum créacé, la formation Namora et une petite terrasse quadernaire (site N21, tabl. V : BELLIER *et al.*, 1989b). Dans les bassins de San Marcos et Cajabamba, ils sont rares et affectent la formation Cajabamba (S2, S9, C2, C3). Les tectoglyphes marquant l'extension N-S sont des stries mécaniques affectant une fine gouge argileuse ou la roche mère. Au SE du bassin de Cajabamba dans le prolongement de sa bordure orientale, un escarpement, d'orientation NNW-SSE et de 10 m de haut, affecte des moraines glaciaires de la dernière glaciation (photo 3). Cet escarpement souligne la faille normale de Chaquilbamba réactivée plusieurs fois au cours de l'Holocène (BELLIER *et al.*, 1989a). La dernière activité ayant eu lieu en avril 1937

TABLEAU IV

Résultats de l'analyse numérique des populations de failles striées pour l'état de contraintes de la compression N-S (.4)  
*Results of the numerical analysis of reverse and strike-slip faults related to the N-S trending compressional tectonics (.4)*

Site	ND	Lat. S	Long. W	$\sigma_1$ Azim. Incl.	$\sigma_2$ Azim. Incl.	$\sigma_3$ Azim. Incl.	R	D
<b>NAMORA</b>								
N9	04	7°10'40	78°18'50	-- NS --	----	----	----	Mz
N24	05	7°11'30	78°21'30	013° 32°	146° 47°	266° 25°	0.55	uM
N25	13	7°11'30	78°21'35	026° 09°	292° 21°	139° 67°	0.80	uM
N6	04	7°12'0	78°21'20	-- NS --	----	----	----	"
<b>SAN MARCOS</b>								
S5	04	7°19'08	78°05'07	-- NS --	----	----	----	Mz
S6	04	"	"	-- NS --	----	----	----	M
S9	11	7°20'15	78°06'15	193° 09°	286° 19°	077° 69°	0.41	"
S4	15	7°20'15	78°06'00	017° 07°	114° 45°	280° 44°	0.90	"
S11	31	7°20'32	78°05'45	351° 11°	247° 52°	089° 35°	0.80	"
S2	15	7°20'45	78°08'30	178° 01°	268° 07°	077° 82°	0.67	"
S12	17	7°20'52	78°05'15	358° 17°	191° 72°	089° 04°	0.95	"
S13	10	7°21'15	78°06'30	356° 18°	219° 66°	091° 16°	0.16	"
<b>CAJABAMBA</b>								
C10	24	7°34'45	78°03'52	233° 01°	324° 50°	142° 40°	0.53	M
<hr/>								
RE.4		7°20'0	78°10'	010° ± 18° 10°	----	----	0.64	

RE.4 : paramètres du tenseur déviatorique régional défini en utilisant la méthode statistique de Fisher. Mêmes légendes que dans le tableau I.

*RE.4 : regional stress tensor parameters according to Fisher's statistical method. Same captions as in table I.*

TABLEAU V

Résultats de l'analyse numérique des populations de failles striées pour l'état de contraintes d'extension N-S (.5)  
*Results of the numerical analysis of normal faults related to the Quaternary roughly N-S trending extensional tectonics (.5)*

Site	ND	Lat. S	Long. W	$\sigma_1$ Azim. Incl.	$\sigma_2$ Azim. Incl.	$\sigma_3$ Azim. Incl.	R	D
<b>NAMORA</b>								
N9	02	7°10'40	78°18'50	----	----	N-S ---	----	Mz
N8	06	7°11'14	78°21'	069° 74°	291° 12°	199° 11°	0.77	uM
N2	23	7°11'16	78°21'20	327° 73°	092° 10°	184° 13°	0.35	"
N21	14	7°11'26	78°21'20	191° 84°	086° 01°	356° 05°	0.37	Q
N11	04	7°11'30	78°20'30	----	----	N-S ---	----	Mz
N15	08	7°11'34	78°20'43	232° 79°	117° 05°	027° 10°	0.83	uM
N17	06	7°11'40	78°20'	107° 70°	288° 20°	188° 01°	0.14	Mz
N6	04	7°12'	78°21'20	----	----	N-S ---	----	uM
N23	15	7°12'20	78°20'10	263° 67°	114° 20°	020° 11°	0.62	Mz
N13	09	7°12'35	78°14'30	229° 78°	115° 05°	024° 10°	0.57	"
N10	13	7°13'	78°18'30	098° 64°	287° 26°	195° 04°	0.54	"
<b>SAN MARCOS</b>								
S9	24	7°20'15	78°06'15	088° 77°	288° 13°	197° 04°	0.41	M
S2	11	7°20'45	78°08'30	240° 72°	106° 13°	014° 13°	0.66	"
S13	01	7°21'15	78°06'30	----	----	N-S ---	----	"
<b>CAJABAMBA</b>								
C2-3	09	7°37'24	78°04'45	099° 72°	273° 18°	004° 02°	0.40	"
CH	11	7°41'	77°59'	264° 83°	097° 07°	007° 02°	0.64	H
<hr/>								
RE.5		7°20'0	78°10'	147° ± 11° 87°	284° ± 12° 02°	014° ± 9° 02°	0.52	

RE.5 : paramètres du tenseur déviatorique régional défini en utilisant la méthode statistique de Fisher. Mêmes légendes que dans le tableau I.

*RE.5 : regional stress tensor parameters according to Fisher's statistical method. Same captions as in table I.*

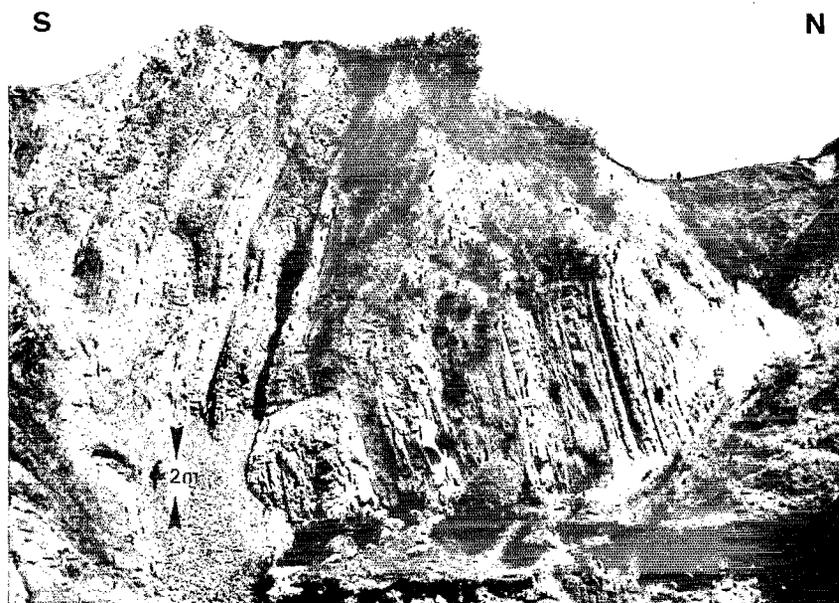


PHOTO 2. — Déformations compressives affectant la formation Cajabamba : verticalisation des couches à proximité d'une faille inverse régionale (S9, fig. 3). *Compressional deformation affecting the Cajabamba Formation : the Cajabamba Formation beds have been verticalized indicating a flexure associated with a regional reverse fault (S9, fig. 3).*

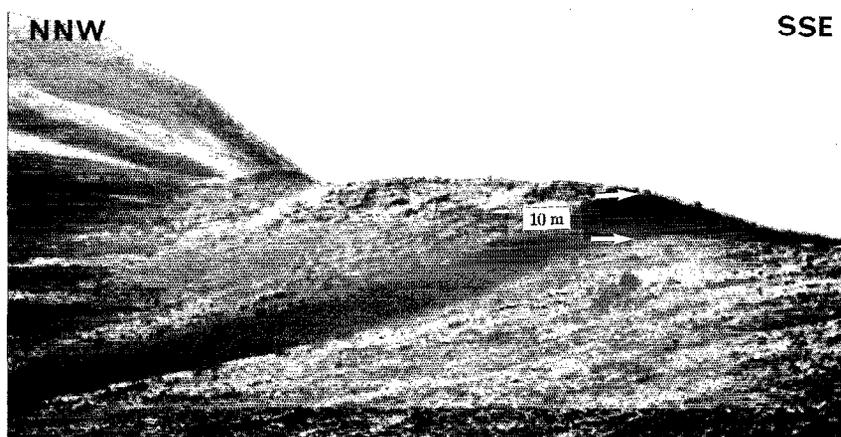


PHOTO 3. — Escarpement de la faille normale de Chaquilbamba affectant une crête morainique de la dernière glaciation. *Chaquilbamba normal fault scarp affecting a Las Glaciation morainic crest.*

lors de deux séismes ayant affecté la région de Cajabamba (IGP, 1986 ; SILGADO, 1978).

Les vecteurs glissement sismiques mesurés sur les plans majeurs marquent une cinématique en accord avec une extension N-S (CH : tabl. V ; et BELLIER *et al.*, 1989a).

Les inversions des vecteurs glissement donnent des états de contraintes en extension dont la direction ( $\sigma_3$ ) est comprise entre N356° et N027° (fig. 7, tabl. V). L'analyse statistique de Fischer, appliquée sur les 12 tenseurs locaux, donne un état de contraintes moyen en extension (RE.5 : fig. 7 et tabl. V) caractérisé par des axes  $\sigma_3$  et  $\sigma_2$  horizontaux orientés respectivement N014° et N284° et un axe  $\sigma_1$  vertical. La moyenne arithmétique des valeurs des rapports R donne un rapport moyen de 0,52 définissant un tenseur triaxial proche de la déformation plane.

## Succession et âge des états de contraintes

### CHRONOLOGIE RELATIVE DES ÉTATS DE CONTRAINTE

Les formations Cajabamba et Namora d'âge miocène sont affectées par des failles normales synsédimentaires compatibles avec l'extension ENE-WSW. Cette extension ENE-WSW affecte les formations Cajabamba, Condebamba, Namora et le socle. Les vecteurs glissement qui correspondent à cette cinématique en extension ENE-WSW sont recoupés et recourent des stries marquant une extension NE-SW. Les failles compatibles avec une extension NE-SW affectent les formations Cajabamba et Condebamba. Nous n'en avons pas observé dans la formation Namora. Ces données impliquent que le changement de cinématique s'est effectué pendant ou après les dépôts de la formation Condebamba mais avant la sédimentation de la formation Namora. Cette extension ENE-WSW, marquée par des failles post-diagenèse de la formation Namora (BELLIER *et al.*, 1989b), continue donc après le dépôt de cette formation d'âge Miocène supérieur et se prolonge probablement durant le Pliocène. Les stries sur les failles caractérisant les extensions d'âge miocène sont recoupées par les stries inverses et décrochantes. Nous avons mis en évidence deux cinématiques compressives différentes qui affectent toutes les formations miocènes. La première est caractérisée par une compression de direction de raccourcissement WNW-ESE et la deuxième par une compression de direction de raccourcissement N-S.

Ces deux cinématiques sont observées dans les formations miocènes et sont reprises par une cinématique en faille normale correspondant à une extension N-S. Cette extension N-S affecte des dépôts quaternaires et holocènes. La cinématique de la faille sismique de Chaquilbamba montre que cette phase est active.

### LES ÉPISODES TECTONIQUES MIOCÈNES A QUATERNAIRES RECONNUS DANS LES ANDES CENTRALES

Dans les Andes centrales, 4 événements compressifs ont été reconnus (e.g. MEGARD, 1984 ; SEBRIER *et al.*, 1988b ; SEBRIER et SOLER, 1990) durant le Néogène et le Quaternaire.

Le premier d'âge miocène inférieur (15-17 Ma : Quechua 1) a été observé dans tout le Pérou (SOULAS, 1977 ; MEGARD *et al.*, 1983 ; MEGARD, 1984 ; SEBRIER *et al.*, 1982 ; 1988b ; MOURIER, 1988 ; NOBLE *et al.*, 1990). Il est caractérisé par une direction de compression NE-SW au Pérou central (SOULAS, 1977 ; MEGARD, 1984) et E-W au Pérou méridional (SEBRIER *et al.*, 1988b). Des accidents majeurs d'orientation N160° impliqués dans les écaïlles du Marañon, semblent avoir joué en décrochement dextre antérieurement à 14 Ma (JANJOU, 1981) sous l'effet d'une compression N-S pouvant correspondre à cet épisode. Dans la région de Huancavelica au Pérou central, l'évolution du bassin de Lircay est liée en partie à cette phase Miocène inférieur (MEGARD *et al.*, 1983). Entre 21 et 17 Ma, ce bassin se développe dans un vaste synclinal associé à une faille inverse dont la déformation progressive s'effectue durant le remplissage congolomératique du bassin.

Le deuxième événement compressif, d'âge miocène moyen (8-10 Ma : Quechua 2), a été mis en évidence au Pérou central et méridional (SOULAS, 1977 ; MEGARD *et al.*, 1984 ; SEBRIER *et al.*, 1988b) où il semble caractérisé par une direction de compression proche de N-S.

Le troisième événement compressif, d'âge miocène supérieur (6-7 Ma : Quechua 3), est bien documenté au Pérou (FARRAR et NOBLE, 1976 ; SOULAS, 1977 ; SEBRIER *et al.*, 1988b ; BLANC, 1984 ; BONNOT, 1984 ; MEGARD, 1984) et correspond à une compression E-W (SOULAS, 1977 ; MEGARD *et al.*, 1984). Dans le bassin d'Ayacucho, au Pérou central, MEGARD *et al.* (1984) ont montré qu'il se développe dans ce bassin des plis et des failles au cours du remplissage miocène du bassin (entre 6 et 7 Ma) entraînant des discordances angulaires intra-formationnelles.

Le quatrième enfin, d'âge pliocène supérieur à pléistocène inférieur (2 Ma) a été observé dans toutes les Andes centrales (SEBRIER *et al.*, 1982, 1988b ; BLANC, 1984 ; LAVENU, 1986 ; MACHARE, 1987 ; BONNOT *et al.*, 1988 ; CABRERA *et al.*, 1990). Dans la région de Cuzco cet épisode tectonique est complexe. Il est caractérisé par deux cinématiques, successives mais contemporaines, de direction de raccourcissement respectivement E-W puis N-S (CABRERA, 1988 ; CABRERA *et al.*, 1990).

Les périodes entre ces événements compressifs sont dominées par de l'extension surtout bien documentée dans les Andes centrales au Pliocène et au Quaternaire. Toutefois, toutes les études géologiques et géophysiques montrent que les Andes sont soumises à un régime globalement compressif où s'instau-

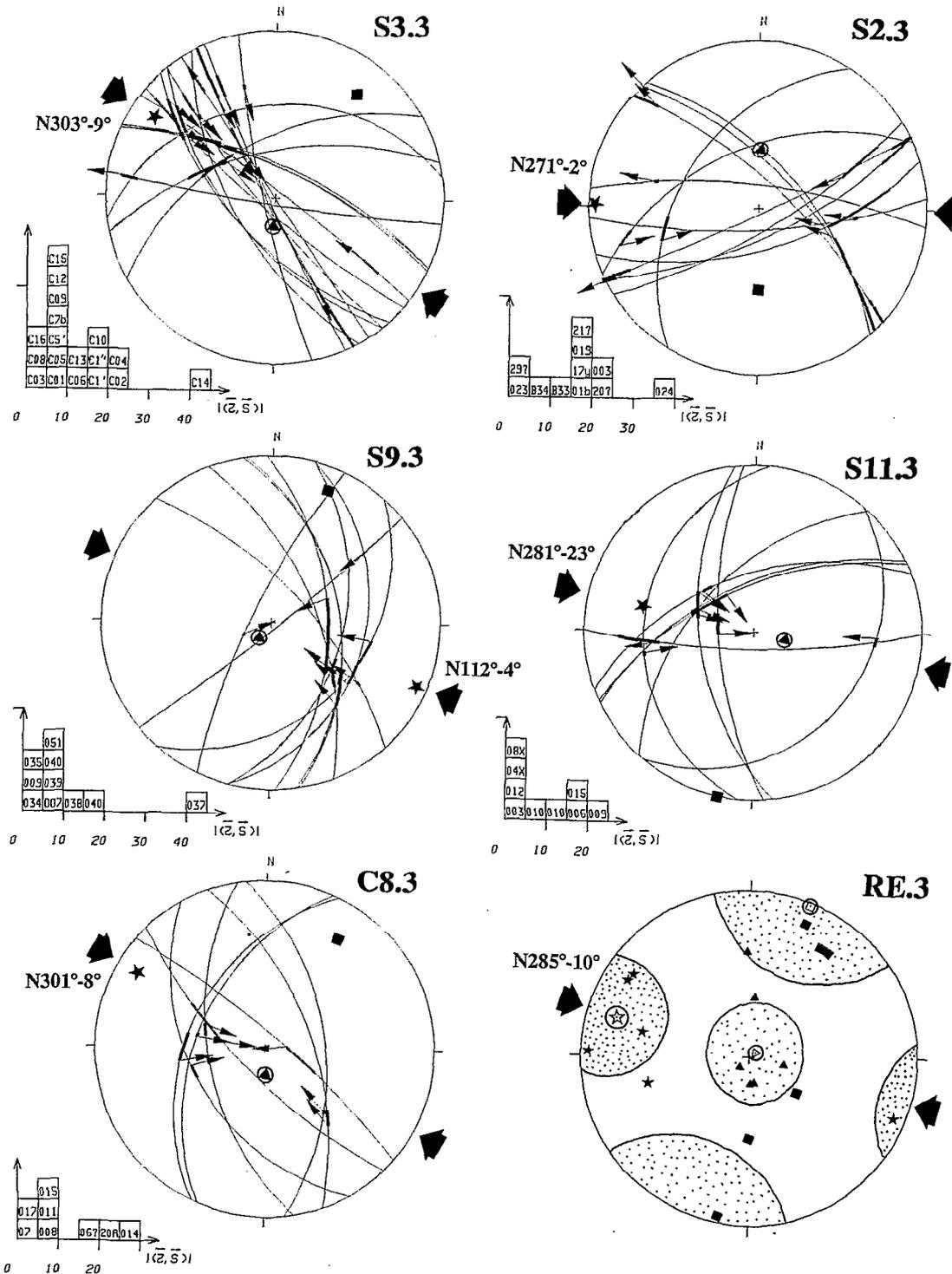


Fig. 8. - Exemples de failles inverses et décrochantes de la phase de compression WNW-ESE (.3 : tabl. III). RE.3 : directions des axes principaux des contraintes de tous les sites analysés de la phase de compression ENE-WSW. Les larges flèches noires représentent l'azimut de l'axe maximum des contraintes ( $\sigma_1$ ). Mêmes légendes que pour la figure 6.

Reverse and strike-slip faults related to the WNW-ESE trending compression (.3 : table III). RE.3 : Computed principal stress direction of all analyzed sites, related to the ENE-WSW compression (.3). Large black arrows indicate azimuths of computed maximum principal stress ( $\sigma_1$ ). Same symbols as in figure 6.

rent localement des déformations en extension liées aux effets de topographie (SEBRIER et SOLER, 1990). Une extension E-W à NE-SW pliocène affecte toutes les Andes péruviennes et boliviennes (BONNOT 1984 ; LAVENU, 1986 ; CABRERA, 1988). Au cours du Pléistocène moyen, il s'instaure une autre période en extension mise en évidence dans la majeure partie des Andes centrales (e.g. DALMAYRAC et MOLNAR, 1981 ; MERCIER, 1981 ; SEBRIER *et al.*, 1982, 1985, 1988a ; SUAREZ *et al.*, 1983 ; CABRERA *et al.*, 1987 ; LAVENU, 1986 ; BONNOT, 1984 ; DEVERCHERE, 1988 ; DEVERCHERE *et al.*, 1989 ; BELLIER *et al.*, 1989a, 1990). Cette extension encore active aujourd'hui est caractérisée par une direction de traction proche de N-S (e.g. SEBRIER *et al.*, 1985, 1988a). Toutefois une étude de microsismicité a montré qu'au droit de la Cordillère blanche la direction d'extension est proche de NE-SW, i.e. orthogonale à la chaîne ; celle-ci est interprétée comme l'effet local du soulèvement de la Cordillère blanche (DEVERCHERE, 1989).

#### AGE DES ÉTATS DE CONTRAINTE ANALYSÉS DANS LES BASSINS DE NAMORA, SAN MARCOS ET CAJABAMBA

L'analyse des déformations et la chronologie relative des états de contrainte montrés dans les bassins étudiés, combinées à la chronologie des événements tectoniques mis en évidence dans les Andes centrales, nous ont permis de dater les différents stades de déformations suivants :

— Une période d'extension miocène (fig. 10 : A) caractérisée par deux états de contraintes en extension ENE-WSW (site .1, RE.1 : fig. 6 et tabl. I) et NE-SW (sites .2, RE.2 : fig. 7 et tabl. II). La cinématique ENE-WSW a été mise en évidence sur des failles normales synsédimentaires affectant les formations Cajabamba et Namora, d'âge miocène et sur des failles post-diagenèse de ces formations montrant qu'elle s'est probablement prolongée durant le Pliocène.

— Deux épisodes compressifs succèdent à cette période d'extension. Le premier caractérisé par une direction de raccourcissement proche de WNW-ESE (sites .3, RE.3 : fig. 8 ; fig. 10 : B ; tabl. III), peut représenter un événement miocène de la tectonique Quechua (6-7 Ma ?) montré au Pérou central et méridional. Le deuxième correspond à une compression N-S (sites .4, RE.4 ; fig. 9 ; fig. 10 : C ; tabl. IV) qui représente probablement l'événement pliocène terminal à quaternaire ancien déjà mis en évidence dans les Andes centrales. Toutefois ces deux compressions WNW-ESE et N-S pourraient également être synchrones et contemporaines à celles qui sont, d'âge pléistocène inférieur, observées dans la région de Cuzco.

— Après ces compressions, un régime d'extension N-S (sites .5, RE.5 : fig. 7 ; fig. 10 : D ; tabl. V) s'instaure au cours du Quaternaire dans la Cordillère occidentale du Nord Pérou. Cette extension est en-

core active comme en témoignent les réactivations holocènes de la faille sismique de Chaquilbamba.

#### DISCUSSIONS ET CONCLUSIONS

Les bassins de Namora, San Marcos et Cajabamba sont des demi-gabens miocènes s'organisant parallèlement aux structures de la Cordillère occidentale. Leurs failles bordières sont d'anciennes structures compressives, réactivées en failles normales pendant l'évolution des bassins. Les bassins de San Marcos et Cajabamba s'installent pendant la surrection des Andes. Leur remplissage sédimentaire fluvio-lacustre (groupe San Marcos), est attribué au Miocène inférieur (?) à supérieur (anté-Tortonien). Les failles normales synsédimentaires et le matériel volcanique remanié observés dans la formation Cajabamba attestent d'un régime tectonique extensif et d'une activité volcanique pendant le remplissage sédimentaire. L'analyse cinématique des failles normales montre que le régime tectonique durant l'évolution des demi-grabens est caractérisée par deux directions d'extension ( $\sigma_3$ ) qui sont successivement ENE-WSW puis NE-SW. Le caractère sédimentaire catastrophique de la fin du remplissage des bassins de San Marcos et Cajabamba ainsi que le changement drastique du contexte sédimentaire du bassin de Namora, entre la période de dépôt de la formation Condebamba et Namora, suggèrent un grand changement lié à un événement important correspondant à la tectonique Quechua (Quechua 3 : 6-7 Ma ?) et probablement responsable de la fermeture des bassins de San Marcos et Cajabamba. Après le soulèvement majeur des Andes nord-péruviennes, le bassin de Namora s'est installé dans une paléo-topographie de la déflexion de Cajamarca. Ce demi-graben est le lieu d'une sédimentation fluvio-lacustre d'âge miocène supérieur. Des niveaux de tufs dacitiques interstratifiés dans les dépôts témoignent d'une activité volcanique synsédimentaire. De nombreuses failles synsédimentaires normales témoignent d'une extension miocène supérieure dont la direction de  $\sigma_3$  est ENE-WSW. Cette extension se poursuit après le remplissage miocène supérieur du bassin de Namora, probablement jusqu'au Pliocène.

Ces périodes d'extension miocène à pliocène (?) (fig. 10 : A) provoquent la formation de demi-grabens intra-cordillérains alors que la vitesse de convergence des plaques Nazca/Amérique est élevée (PILGER, 1984 ; PARDOS-CASAS et MOLNAR, 1988). Cette période de taux de convergence élevé est caractérisée par une extension pratiquement orthogonale à la Cordillère et à la fosse, orientée N160° à ce niveau de la chaîne andine. Cette phase résulterait surtout des forces de volume gravitaires du fait d'un faible couplage au niveau de la subduction. Ces forces de volume seraient produites à cette période par un fluage du matériel andin vers la fosse.

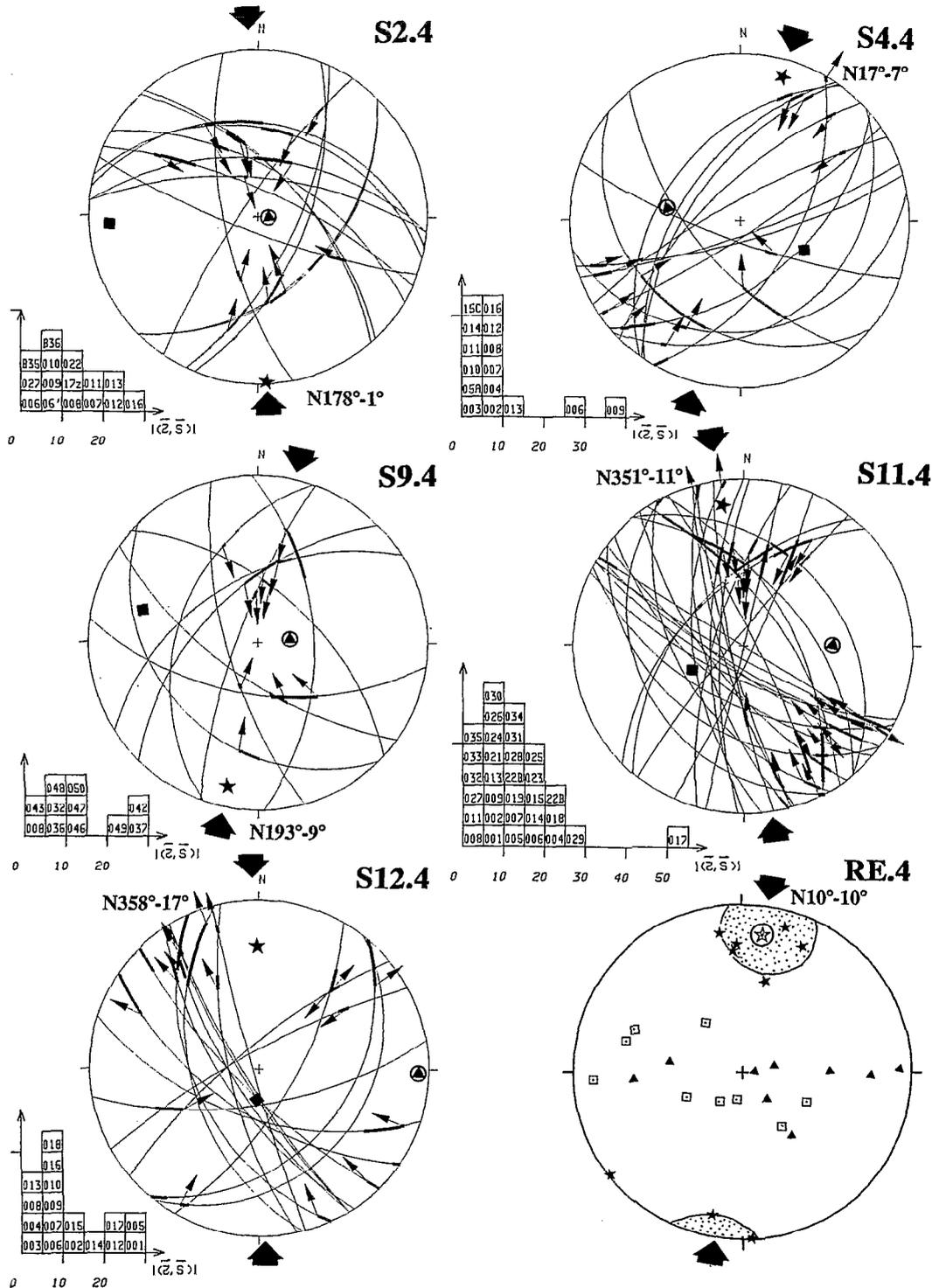


Fig. 9. - Exemples de failles inverses et décrochantes de la phase de compression N-S (.4 ; tabl. IV). RE.4 : directions des axes principaux des contraintes de tous les sites analysés de la phase de compression N-S. Mêmes légendes que pour la figure 6.

Reverse and strike-slip faults related to the N-S trending compression (.4 ; table IV). RE.4 : Computed principal stress directions of all analyzed sites, related to the N-S compression (.4). Same symbols as in figure 6.

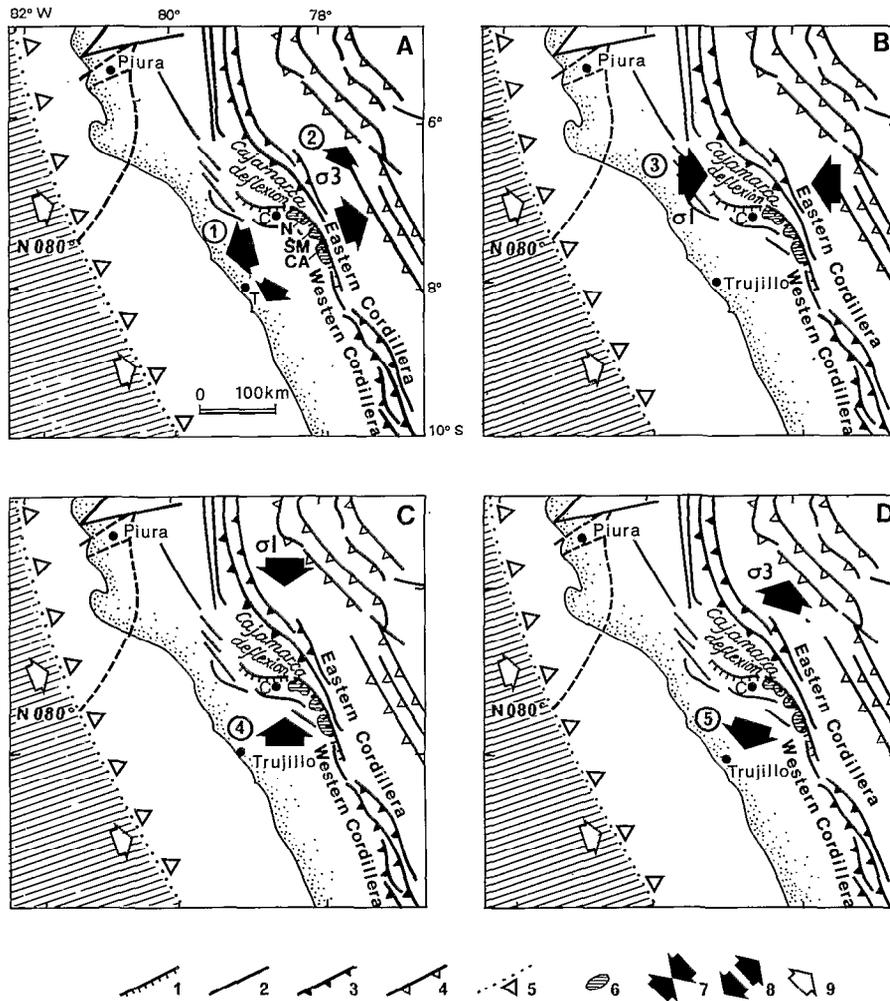


Fig. 10. - Évolution géodynamique néogène et quaternaire de la Cordillère occidentale du Pérou septentrional.

A : Extensions miocènes ENE-WSW (1) et NE-SW (2) ; B : compression WNW-ESE (3) ; C : compression N-S (4) ; D : extension quaternaire N-S (5).

(1) failles normales miocènes ; (2) failles régionales ; (3) chevauchements et failles inverses des écaïles du Marañon ; (4) chevauchements de la zone subandine ; (5) fosse de subduction ; (6) bassins étudiés : (N) Namora, (SM) San Marcos, (CA) Cajabamba ; (7) directions de compression ( $\sigma_1$ ) ; (8) direction d'extension ( $\sigma_3$ ) ; (9) direction de convergence de la plaque Nazca (PILGER, 1984).

*Neogene to Quaternary geodynamic evolution of the Western Cordillera of Northern Peru.*

A : Intra-cordilleran Miocene ENE-WSW (1) and NE-SW (2) extensional tectonics ; B : Intra-cordilleran WNW-ESE compressional tectonics (3) ; C : Intra-cordilleran N-S compressional tectonics (4) ; D : Intra-cordilleran Quaternary N-S extensional tectonics (5).

(1) Miocene normal faults ; (2) Regional faults ; (3) Thrust and reverse faults of the Marañon Thrust and Fold Belt ; (4) Subandean Thrust and Fold Belt ; (5) Subduction trench ; (6) Studied basins : (N) Namora, (SM) San Marcos and (CA) Cajabamba basins ; (7) Compressional direction ; (8) Miocene extensional direction ( $\sigma_3$ ) ; (9) Nazca plate convergence direction (PILGER, 1984).

Durant la fin du Néogène et le début du Quaternaire, la Cordillère occidentale est affectée par deux compressions (fig. 10 : B et C). Celles-ci font rejouer les accidents anciens du substratum et déforment les dépôts du remplissage miocène des bassins. Ces déformations sont des flexurations régionales, des plis généralement déversés et faillés, des failles inverses et décrochantes et des fentes de tension. Elles résultent de deux compressions de directions pres-

que orthogonales et dont la chronologie est bien établie ; la première WNW-ESE (fig. 10 : B) et la deuxième N-S (fig. 10 : C). Durant la première, la direction de compression est sub-parallèle à la direction de convergence E-W. Il s'agit probablement de la phase Quechua du Miocène supérieur reconnue au Pérou central et méridional. La deuxième est marquée par une direction de compression N-S perpendiculaire à la convergence. Elle représenterait la compres-

sion pliocène terminal à pléistocène inférieur recon- nue dans le reste du Pérou. Toutefois nos travaux n'ont pas permis de donner des arguments fiables concernant l'âge de ces compressions. Ces épisodes de compression marquent des périodes de couplage élevé entre les plaques au niveau de la zone de subduction. Ce couplage élevé induit une contrainte  $\sigma_{Hmax}$  transmise dans la chaîne orientée parallèlement à la convergence, c'est-à-dire proche de E-W. La compression N-S perpendiculaire à la convergence est probablement corrélative elle aussi d'une période de couplage important. L'orientation particulière de la contrainte transmise dans la chaîne est probablement le fait d'instabilités liées à la géométrie de la bordure de plaque (KATO *et al.*, 1980 ; SHIMAZAKI *et al.*, 1978) et/ou de la Cordillère.

Au cours du Quaternaire, une extension de direction N-S réactive quelques accidents de la Cordillère occidentale et affecte les dépôts néogènes et quaternaires (fig. 10 : D). La faille de Chaquibamba, réactivée en 1937, témoigne de l'activité sismique de cette tectonique. Cette extension N-S, documentée dans toutes les Andes centrales, marque une nouvelle diminution du couplage entre les plaques. Elle est expliquée par un modèle qui fait interagir les forces de volume résultant d'une haute topographie compensée (SEBRIER *et al.*, 1985, 1988a) et les forces en bordure de la plaque américaine. Cette étude a permis de montrer que les forces de volume restent prépondérantes dans la Cordillère même pour des altitudes modérées de l'ordre de 3 000-3 100 m.

Nos résultats montrent une remarquable homogénéité entre les états de contraintes enregistrés dans la portion de Cordillère orientée N160° et dans la dé-

flexion E-W de Cajamarca. Il n'existe donc pas de perturbation notable du champ de contrainte régional dans les secteurs de Cordillère de direction atypique telle que la déflexion de Cajamarca. D'autre part, il ne semble donc pas y avoir au cours du Néogène et du Quaternaire de rotation différentielle entre la déflexion de Cajamarca et les secteurs de la Cordillère d'orientation « typique » NNW-SSE.

En conclusion, nous noterons qu'à l'inverse des Andes septentrionales d'Équateur où le régime tectonique mis en évidence est compressif décrochant depuis le Miocène inférieur (NOBLET *et al.*, 1988 ; WINTER et LAVENU, 1989) les Andes centrales sont soumises apparemment à un régime globalement compressif où s'instaurent localement des déformations en extension liées aux effets de topographie (SEBRIER et SOLER, 1990). Cette différence est probablement liée à l'orientation de la convergence qui est oblique par rapport à la marge équatorienne alors qu'elle est presque normale à la marge péruvienne ; l'obliquité de la convergence produisant la migration vers le nord du bloc nord-andin le long d'une grande faille dextre traversant la Cordillère équatorienne.

#### Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'un programme de recherche entre l'Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération (ORSTOM) et l'Instituto Geofísico del Perú (IGP). Nous remercions M. BONHOMME de l'Institut Dolomieu (Grenoble) pour ses analyses radiométriques des échantillons de tufs, les responsables et les chercheurs du Département TOA de l'ORSTOM, de la Mission ORSTOM-Lima et de l'IGP qui nous ont soutenu tout au long de ce travail et plus particulièrement P. SOLER pour la lecture critique et constructive du manuscrit.

*Manuscrit accepté par le Comité de rédaction le 15 décembre 1989*

## BIBLIOGRAPHIE

- AUDEBAUD (E.), CAPDEVILA (R.), DALMAYRAC (B.), DEBELMAS (J.), LAUBACHER (G.), LEFÈVRE (C.), MAROCCO (R.), MARTINEZ (C.), MATTAUER (M.), MEGARD (F.), PAREDES (J.) et TOMASI (P.), 1973. — Les traits géologiques essentiels des Andes centrales (Pérou-Bolivie). *Rev. Géogr. Phys. Géol. Dyn.*, 15 : 73-113.
- BELLIER (O.), 1989. — Tectonique en extension et changement d'états de contraintes cénozoïque en domaine intra-continental : exemple des bassins intra-cordillères des Hautes Andes (Nord Pérou) et du graben de la Wei He (Chine du Nord). Thèse de doct., Univ. de Paris-Sud, 296 p.
- BELLIER (O.), MACHARE (J.) et SEBRIER (M.), 1989a. — Extension actual del Norte Perú : Estudio de la falla activa de Chaquibamba (Norte del departamento de La Libertad-Perú). *Bol. Soc. Geol. Perú* (sous presse).
- BELLIER (O.), SEBRIER (M.), FORTANIER (E.), GASSE (F.) et ROBLES (I.), 1989b. — Neogene and Quaternary geodynamic evolution of an intra-cordilleran basin : the Namora basin in Northern Peruvian Andes. *Annales Tectonicae*, 3 : 77-98.
- BELLIER (O.), DUMONT (J.F.), SEBRIER (M.) et MERCIER (J.L.), 1990. — Neotectonics and Kinematics of the active Quiches fault zone, reactivated during the November 10, 1946 Ancash earthquake (Northern Peruvian Andes). Soumis à *Bull. Seism. Soc. Am.*
- BLANC (J.L.), 1984. — Néotectonique et sismotectonique des Andes du Pérou central dans la région de Huancayo. Thèse de Doct., 3<sup>e</sup> cycle, Univ. de Paris-Sud : 162 p.
- BONNOT (D.), 1984. — Néotectonique et tectonique active de la Cordillère blanche et du Callejón de Huaylas (Andes nord péruviennes). Thèse de Doct., 3<sup>e</sup> cycle, Univ. de Paris-Sud : 200 p.
- BONNOT (D.), SEBRIER (M.) et MERCIER (J.L.), 1988. — Évolution géodynamique plioquaternaire du bassin intra-cordillères du Callejón de Huaylas et de la région de la Cordillère blanche, Pérou. *Géodynamique*, 3 : 57-63.
- CABRERA (J.), 1988. — Néotectonique et sismotectonique dans la Cordillère andine au niveau du changement de géométrie de la subduction : La région de Cuzco (Pérou). Thèse de Doct., 3<sup>e</sup> cycle, Univ. de Paris-Sud : 275 p.
- CABRERA (J.), SEBRIER (M.) et MERCIER (J.L.), 1987. — Active normal faulting in High Plateaus of Central Andes : The Cuzco Region (Peru). *Annales Tectonicae*, 1 : 116-138.
- CABRERA (J.), SEBRIER (M.) et MERCIER (J.L.), 1990. — Plio-Quaternary geodynamic evolution in the Andean Cordillera located above the subduction change geometry : The Cuzco Region (Peru). Accepté à *Tectonophysics*.

- CAREY (E.) et BRUNIER (B.), 1974. — Analyse théorique et numérique d'un modèle mécanique élémentaire appliqué à l'étude d'une population de failles. *C.R. Acad. Sc. Paris*, 279 : 891-894.
- CAREY (E.), 1979. — Recherche des directions principales de contraintes associées au jeu d'une population de failles. *Rev. Géol. Dyn. Géogr. Phys.*, 21 : 57-66.
- Catálogo Sísmico del Perú (1500-1982), 1986. — E. Huaco ed., Edición Inst. Geof. Perú, 404 p.
- COBBING (E.J.), PITCHER (W.S.), WILSON (J.J.), BALDOCK (J.W.), TAYLOR (W.P.), McCOURTY (W.) et SNELLING (N.J.), 1981. — The geology of the Western Cordillera of northern Peru. *Mem. Inst. Geol. Sc. London*, 5 : 252 p.
- DALMAYRAC (B.), LAUBACHER (G.) et MAROCCO (R.), 1980. — Caractères généraux de l'évolution géologique des Andes péruviennes. *Trav. et Doc. ORSTOM*, 122 : 501 p.
- DALMAYRAC (B.) et MOLNAR (P.), 1981. — Parallel thrust and normal faulting in Peru and constraints on the state of stress. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 55 : 473-481.
- DEVERCHERE (J.), 1988. — Extension crustale dans un contexte de convergence de plaques : L'exemple des Andes du Pérou central contraint par des données sismotectoniques. Thèse de doct., Univ. de Paris-Sud, 275 p.
- DEVERCHERE (J.), DORBATH (C.) et DORBATH (L.), 1989. — Extension related to high topography : results from a microearthquake survey in the Andes of Peru and tectonic implications. *Geophys. J. Int.*, 98 : 281-292.
- FARRAR (E.) et NOBLE (D.C.), 1976. — Timing of late Tertiary deformation in the Andes of Peru. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 87 : 1247-1250.
- FOURTANIER (E.), 1987. — Diatomées néogènes d'Afrique : approche biostratigraphique en milieux marins (Sud-Ouest africain) et continental. Thèse de Doct., Univ. de Paris VI, 365 p.
- JANJOU (D.), 1981. — Données géologiques pour un modèle d'évolution des Andes nord-péruviennes entre 5° S et 7° S. Les écaïlles du Marañon, le district minier de Hualgayoc et la région de Cutervo-Jean. Thèse de Doct., 3<sup>e</sup> cycle, Univ. de Paris VI : 170 p.
- KATO (T.), SHIMAZAKI (K.) et YAMASHINA (K.), 1980. — State of stress within a thin elastic wedge : a model of internal deformation of the continent at arc-arc junctions. *Geophys. J.R. astr. Soc.*, 60 : 377-390.
- KREBS (W.N.), BRADBURY (J.P.) et THERIOT (E.), 1988. — Neogene and Quaternary lacustrine diatom biochronology, Western USA. *Palabios*, 2 : 505-513.
- LAVENU (A.), 1986. — Étude néotectonique de l'Altiplano et de la Cordillère orientale des Andes boliviennes. Thèse de Doct. d'État, Univ. de Paris-Sud : 434 p.
- MACHARE (J.), 1987. — La marge continentale du Pérou : Régimes tectoniques et sédimentaires cénozoïques de l'avant-arc des Andes centrales. Thèse de Doct., Univ. Paris-Sud : 391 p.
- 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.
- MEGARD (F.), 1984. — The Andean orogenic period and its major structures in central and northern Peru. *J. Geol. Soc. London*, 141 : 893-900.
- MEGARD (F.), MAROCCO (R.), VICENTE (J.C.), MNOS (C.), PASTOR (R.) et MEGARD-GALLI (J.), 1983. — Apuntes sobre la geología de Lircay (Huancavelica, Perú Central). El plegamiento tardihercínico y las modalidades del plegamiento andino (fase quechua). *Bol. Soc. Geol. Perú*, 71 : 255-262.
- MEGARD (F.), NOBLE (D.C.), McKEE (E.H.) et BELLON (H.), 1984. — Multiple pulses of Neogene compressive deformation in the Ayacucho intermontane basin, Andes of central Peru. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 95 : 1108-1117.
- MOURIER (T.), 1988. — La transition entre Andes marginales et Andes cordilleraïnes à ophiolites : évolution sédimentaire, magmatique et structurale du relais de Huancabamba (3° à 8° Lat. S ; Nord Pérou-Sud Équateur). Thèse de Doct. d'État, Univ. de Paris-Sud : 301 p.
- NOBLE (D.C.), McKEE (E.H.) et MEGARD (F.), 1979. — Early Tertiary « Incaic » tectonism, uplift, and volcanic activity, Andes of central Peru. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 90 : 903-907.
- NOBLE (D.C.), McKEE (E.H.), MOURIER (T.) et MEGARD (F.), 1990. — Cenozoical stratigraphy, magmatic activity, compressive deformation and uplift in Northern Peru. *Geol. Soc. Am. Bull.* (sous presse).
- NOBLET (C.), LAVENU (A.) et SCHNEIDER (F.), 1988. — Étude géodynamique d'un bassin intramontagneux tertiaire sur décrochements dans les Andes du sud de l'Équateur : l'exemple du bassin de Cuenca. *Géodynamique*, 3 : 117-138.
- PARDO-CASAS (F.) et MOLNAR (P.), 1987. — Relative motion of the Nazca (Farallon) and South American plates since Late Cretaceous time. *Tectonics*, 6 : 233-248.
- PILGER (R.H.), 1984. — Cenozoic plate kinematics, subduction and magmatism : South American Andes. *J. Geol. Soc. London*, 141 : 793-802.
- PROSCHKINA-LAVRENKO (A.I.) et al., 1974. — The diatoms of the URSS - fossil and recent (en Russe). Nauka, Leningrad, 1 : 463 p.
- REYES (L.), 1980. — Geología de los cuadrángulos de Cajamarca, San Marcos y Cajabamba. *Bol. Inst. Geol. Min. Metal. Perú*, 31 : 67 p.
- SEBRIER (M.), HUAMAN (D.), BLANC (J.L.), MACHARE (J.), BONNOT (D.) et CABRERA (J.), 1982. — Observaciones acerca de la Neotectónica del Perú. Inf. Prog. SISRA-CERESIS. Lima, 110 p.
- SEBRIER (M.), MERCIER (J.L.), MEGARD (F.), LAUBACHER (G.) et CAREY-GAILHARDIS (E.), 1985. — Quaternary normal and reverse faulting and the state of stress in Central Andes of South Peru. *Tectonics*, 4 : 739-780.
- SEBRIER (M.), MERCIER (J.L.), MACHARE (J.), BONNOT (D.), CABRERA (J.) et BLANC (J.L.), 1988a. — The state of stress in an overriding plate situated above a flat slab : The Andes of Central Peru. *Tectonics*, 4 : 895-928.
- SEBRIER (M.), LAVENU (A.), FORNARI (M.) et SOULAS (J.P.), 1988b. — Tectonics and uplift in Central Andes (Peru, Bolivia and Northern Chile) from Eocene to present. *Géodynamique*, 3 : 85-106.
- SEBRIER (M.) et SOLER (P.), 1990. — Tectonics and magmatism in the Peruvian Andes from Late Oligocene to Present. Accepté dans « Andean magmatism and its tectonic setting », *Geol. Soc. Am. Special Papers*.
- SHIMAZAKI (K.), KATO (T.) et YAMASHINA (K.), 1978. — Basic types of internal deformation of the continental plate at arc-arc junctions. *J. Phys. Earth*, 26 Suppl. : 69-83.
- SILGADO (E.), 1978. — Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú (1513-1974). *Bol. Inst. Geol. Min. ser.*, C 3 : 130 p.
- SOULAS (J.P.), 1977. — Les phases tectoniques andines du Tertiaire supérieur, résultats d'une transversale Pisco-Ayacucho (Pérou central). *C.R. Ac. Sci. Paris, Sér. D*, 284 : 2207-2210.
- STEINMANN (G.), 1929. — Geologie von Peru. Karl Winter, Heidelberg : 448 p.
- SUAREZ (G.), MOLNAR (P.) et BURCHFIELD (B.), 1983. — Seismicity, fault plane solutions, depth of faulting, and active tectonics of the Andes of Peru, Ecuador and southern Colombia. *J. Geophys. Res.*, 88 : 10403-10428.
- WATSON (G.S.), 1960. — More significance tests on the sphere. *Biometrika*, 47 : 87-91.
- WILSON (J.J.), REYES (L.) et GARAYAR (J.), 1967. — Geología de los Cuadrángulos de Mollebamba, Tayabamba, Huaylas, Pomabamba, Carhuaz y Huari. *Bol. Serv. Geol. Min. Perú*, 16 : 95 p.
- WINTER (T.) et LAVENU (A.), 1989. — Tectonique active en Équateur : ébauche d'une nouvelle interprétation géodynamique. *Bull. Inst. Fr. Et. And.*, 18 : 95-115.