

**FAILLES VERTICALES A STRIES VERTICALES
AFFECTANT DES IGNIMBRITES PLIO-QUATERNAIRES (SILLAR)
DANS LE SUD DU PÉROU (AREQUIPA)**

Alain LAVENU

Géologue de l'O.R.S.T.O.M.
21, rue Bayard, 75008 Paris - France

RÉSUMÉ

Une analyse de la tectonique plio-quaternaire en deux points du Sud du Pérou montre une tectonique cassante originale due essentiellement à des mouvements verticaux et qui jusqu'alors n'a pas été décrite. Il y a en effet très peu de déformation du matériel dans le plan horizontal et les glissements verticaux au long de plans verticaux prédominent. Les observations, portant uniquement sur des stries, ont été faites dans les ignimbrites (sillar) du bassin d'Arequipa et dans des séries conglomératiques près de Moquegua. Ces formations sont datées entre 4,2 et 2,5 M.A. L'étude des failles montre que leur pendage est compris entre 65 et 90° avec un maximum entre 80 et 90°. Le pitch des stries varie de 70 à 90°. Que ce soit par la méthode graphique d'Arthaud ou par les méthodes de calcul, on détermine toujours un ellipsoïde des déformations de révolution autour de l'axe vertical. Ces différents modèles d'étude montrent qu'il n'est pas possible de déterminer les deux axes dans le plan horizontal. Comme il y a peu ou pas d'extension dans le plan horizontal nous sommes en présence de mouvements purement verticaux. Ces mouvements de blocs pourraient être dus à des montées de corps intrusifs en « bulle » ayant pour effet en surface des réajustements de la couverture, ce qui s'accorderait avec l'hypothèse d'Hamilton qui pense que la mise en place de cette couverture volcanique calco-alcaline s'accompagne de la montée d'intrusions comagmatiques.

RESUMEN

Un análisis de la tectónica plio-quaternaria en dos puntos del sur del Perú demuestra una tectónica de ruptura original debida esencialmente a movimientos verticales, la cual no ha sido descrita todavía. Hay muy poca deformación del material en el plano horizontal y el deslizamiento vertical a lo largo de los planos verticales predomina. Las observaciones han sido efectuadas en las ignimbritas (sillar) de la cuenca de Arequipa y dentro de las series conglomeráticas cerca de Moquegua. Estas formaciones tienen una edad comprendida entre 4,2 y 2,5 M.A. El estudio está restringido a las fallas y a las estrias observadas en los espejos. El buzamiento de las fallas varía entre 60 y 90° con máximo entre 80 y 90°. El pitch de las estrias varía de 70 a 90°. Que sea por el método gráfico de Arthaud o por los métodos de cálculo, se determina siempre un elipsoide de las deformaciones de tipo de revolución alrededor del eje vertical. Estos diferentes modelos de estudio demuestran que no es posible determinar los dos ejes en el plano horizontal. Como hay poca o no extensión en el plano horizontal se puede deducir que estamos en presencia de movimientos únicamente verticales. Estos movimientos de bloques podían ser originados por la subida de cuerpos intrusivos que producirían en superficie reajustes de la cobertura, lo que cuadraría con la hipótesis de Hamilton, según la cual el emplazamiento de esa cobertura volcánica calco-alcalina se produce durante la subida de intrusiones comagmáticas.

ABSTRACT

An analysis of the Plio-Quaternary tectonics at two places in southern Peru shows an original brittle deformation that corresponds essentially to vertical movements. There is very few deformation indeed of the material in the horizontal plane and vertical sliding along vertical plane prevails. More than 200 faults, all of there with well exposed slickensides bearing clear striae, were studied in the ignimbrite (sillar) of the Arequipa basin and conglomeratic series near

Moquegua. These formations date back to between 4,2 and 2,5 M.A. The dip of the faults veers from 65 to 90° with a maximum between 80 and 90°; the pitch of the striae varies from 70 to 90°. With the graphical method of Arthaud or with the numerical methods, we always determine an uniaxial strain ellipsoid and it is not possible to determine the two axis of the horizontal plane. As there is no or very little extension in the horizontal plane movements appear to be almost purely vertical. These bloc movements could be due to the ascension of "bubble" intrusive bodies which cause readjustments of the cover on the surface, that would fit with the hypothesis of Hamilton who thinks that the setting of this calcalkaline volcanic cover is accompanied by the emplacement of comagmatic intrusion at depth.

РЕЗЮМЕ

Анализ плио-четвертичной тектоники в двух пунктах южной части Перу показывает своеобразную тектонику разломов, преимущественно связанную с вертикальными движениями, которая до сих пор еще не была описана. Деформаций материала в горизонтальном плане здесь в самом деле мало, и преобладают вертикальные сдвиги по вертикальным планам. Наблюдения, касающиеся исключительно борозд, были произведены в игнимбритах (силлар) бассейна Арекипа и в конгломератных сериях около Мокуега. Датирования этих образований указывают возраст между 4,2 и 2,5 М. Л. Изучение сбросов показывает, что их падение представляет между 65 и 90°, с максимумом между 80 и 90°. Наклон борозд колеблется между 70 и 90°. Как графическим методом Арто, так и вычислительными методами, всегда определяется эллипсоид вращательных вокруг вертикальной оси деформаций. Эти различные способы исследования показывают, что определить обе оси в горизонтальном плане невозможно. Поскольку распространение в этом плане незначительно или вовсе отсутствует, мы имеем дело с чисто вертикальными движениями. Эти движения блоков возможно связаны с поднятием «пузыревидных» интрузивных тел, производящих на поверхности преобразования покрова, что соответствовало бы гипотезе Гамильтона, согласно которой размещение этого известково-щёлочного вулканического покрова сопровождается поднятием комагматических интрузий.

Au Pérou, de nombreux phénomènes de tectonique cassante récente ou actuelle sont décrits dans des séries volcaniques et sédimentaires plio-quadernaires (DALMAYRAC, 1974 ; DOLLFUS, 1965 ; MÉGARD, 1973). Des déformations identiques sont décrites par SALAS *et al.* (1966) au Chili. Ce travail se propose d'étudier des failles plio-quadernaires dans le sud péruvien et de déterminer les directions principales de la déformation responsable de cette tectonique récente.

CADRE GÉOLOGIQUE ET STRATIGRAPHIQUE.

La fracturation des séries volcaniques et sédimentaires plio-quadernaires a pu être étudiée dans les régions d'Arequipa et de Moquegua (fig. 1).

Le bassin d'Arequipa, sur le flanc occidental des Andes, est limité à l'W et au S par le batholite côtier, au N et à l'E par les volcanites quadernaires « Barroso ». Il est dominé au NE par la chaîne des volcans récents : Chachani, Misti et Pichu-Pichu. Ce bassin est rempli, en particulier, d'une épaisse série volcanique ignimbritique plio-quadernaire, appelée Sillar, qui repose en discordance sur des séries secondaires et sur le batholite (fig. 2). Au SW du batholite, cette ignimbrite a débordé vers les pampas où elle s'intercale dans une série détritique, dénommée

« formation des pampas ». Cette série détritique, conglomératique, est formée d'éléments bien roulés, des gneiss, quartzites, laves, des passées de sable, le tout dans une matrice peu consolidée.

La série ignimbritique se présente sous deux aspects : un niveau supérieur, friable, de couleur rose et un niveau inférieur, blanc, compact qui est utilisé comme pierre de construction. Ces bancs d'ignimbrites sont subhorizontaux. Dans le bassin même, des alluvions lacustres, sont intercalées dans la série volcanique. L. VARGAS (1970) estime son épaisseur à 150 m.

C'est seulement dans la série inférieure, compacte, que nous avons observé et étudié les failles.

Cette série est considérée actuellement d'âge plio-quadernaire sans plus de précision. Elle est rattachée généralement à la formation « Perez » de l'altiplano bolivien. Cette dernière formation est datée à 2,5 M.A., ce qui la situe à la fin du Pliocène et au début du Pleistocène (EVERNDEN *et al.*, 1966). Il a été trouvé aussi une formation pétrographiquement analogue dans la Cordillère Orientale donnant un âge de 4,2 M.A. (BARNES *et al.*, 1970).

Dans la région de Moquegua, et plus précisément dans les pampas de la Clemesi, entre la Sierra et la Cordillère Côtière, une formation détritique congl-

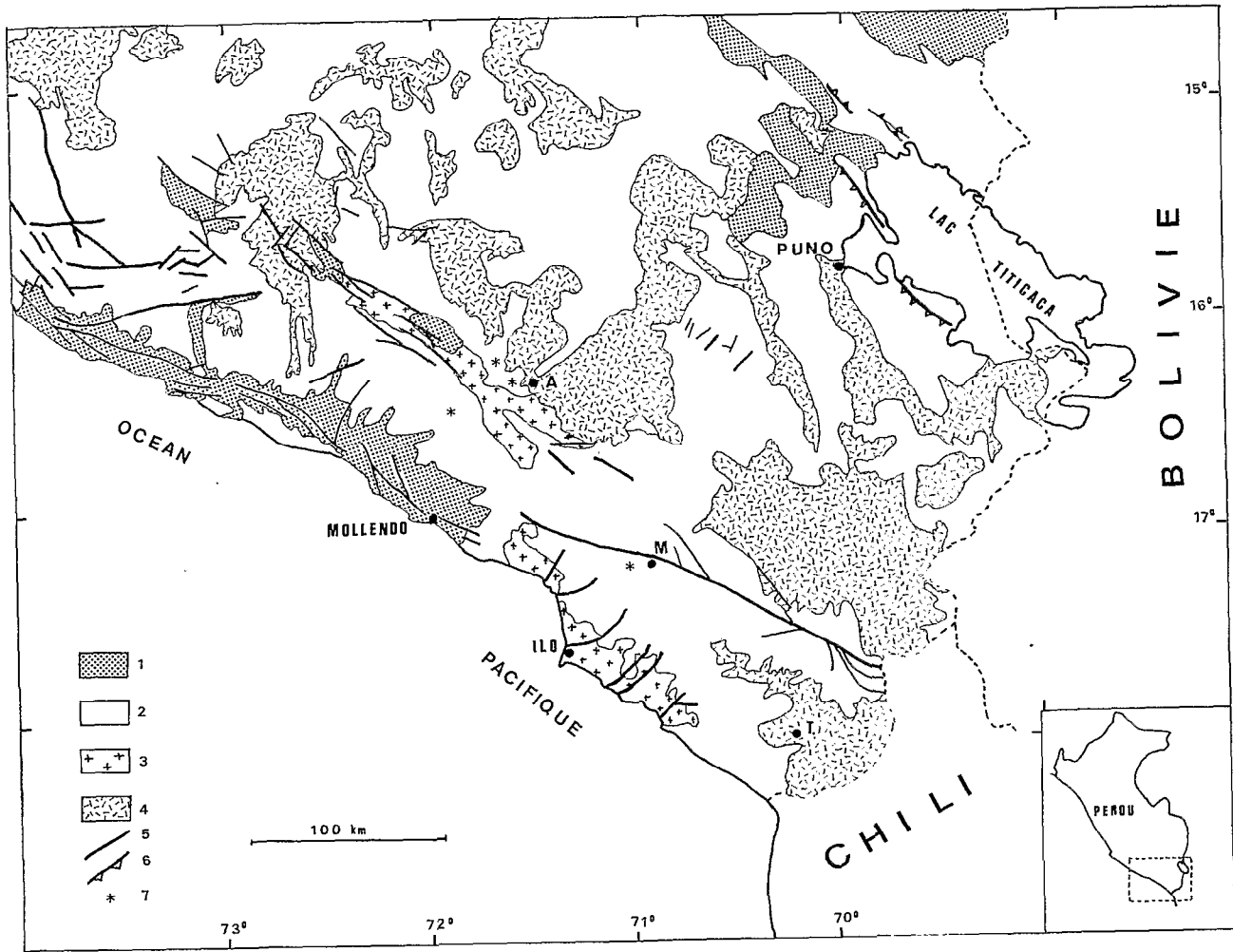


Fig. 1. — Esquisse structurale du Sud du Pérou.

1 : zone des plissements précambriens et paléozoïques ; 2 : zone des plissements andins ; 3 : batholite côtier ; 4 : sédiments et volcanites post-tectonique andine ; 5 : failles ; 6 : chevauchements ; 7 : stations de mesures ; A : Arequipa ; M : Moquegua ; T : Tacna.

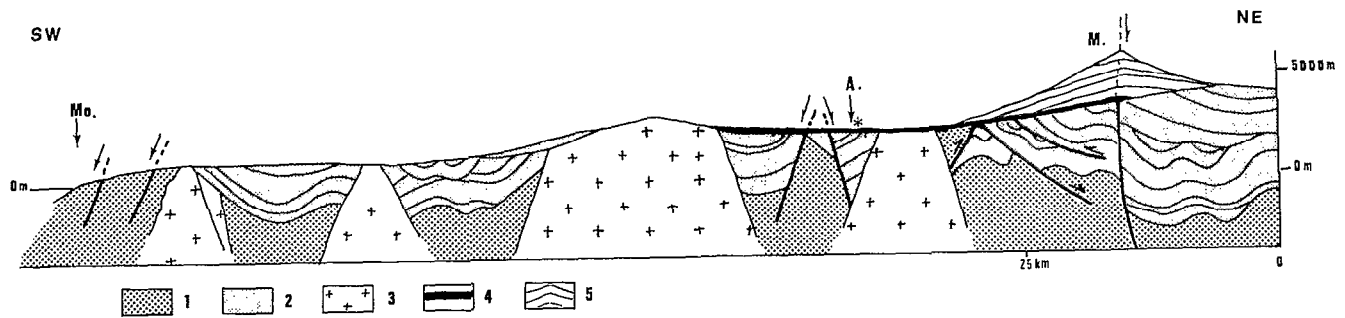


Fig. 2. — Coupe Mollendo-Arequipa (d'après G. LAUBACHER et R. MAROCCO). 1 : Précambrien ; 2 : couverture regroupant primaire, secondaire et tertiaire ; 3 : batholite côtier ; 4 : ignimbrites (sillar) ; 5 : volcanique quaternaire ; Mo : Mollendo ; A : Arequipa ; M : volcan Misti.

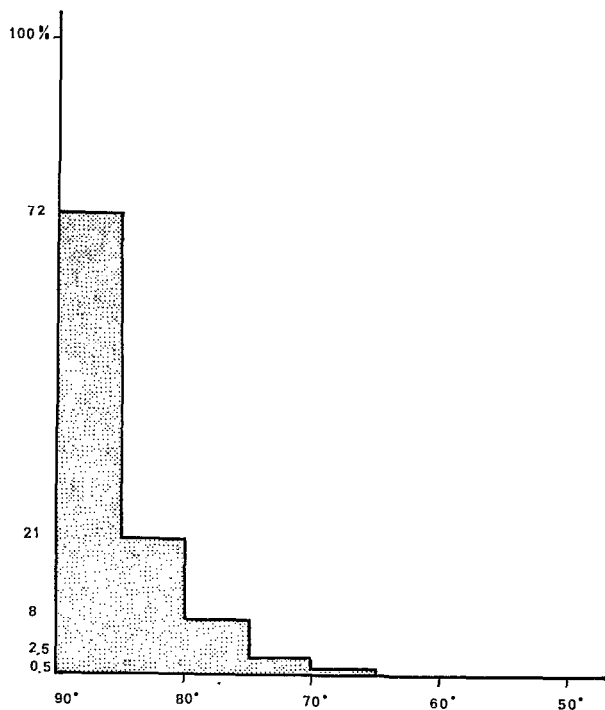


Fig. 3. — Histogramme des pendages de failles (219 failles normales).

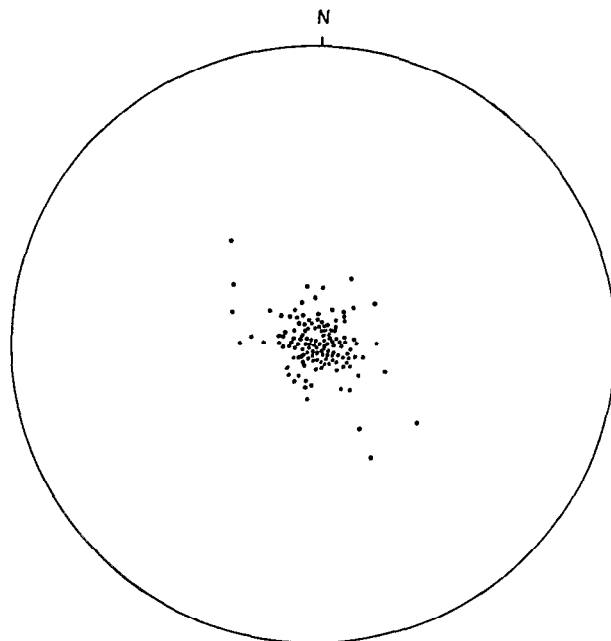


Fig. 4. — Diagramme de répartition des pitches (stéréogramme de Schmidt, héli. inf.).

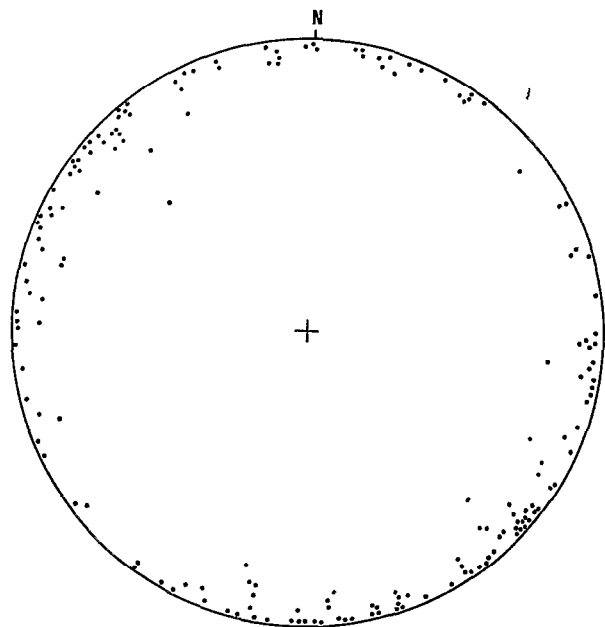


Fig. 5. — Diagramme de répartition des pôles de failles.

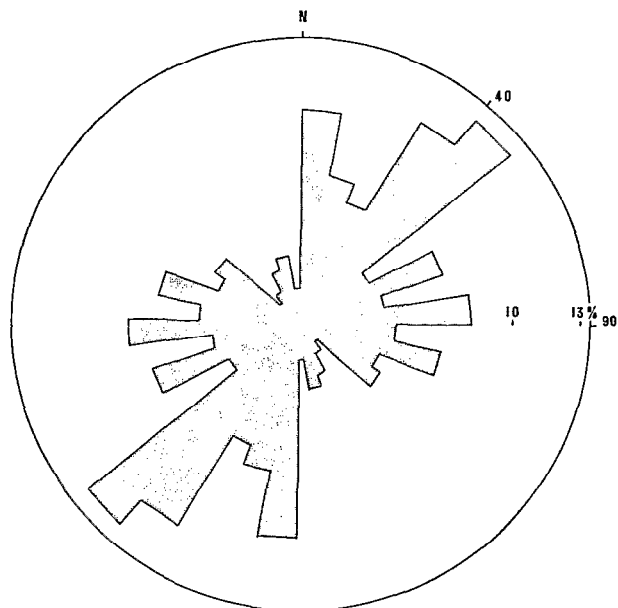


Fig. 6. — Distribution des directions de la fracturation.

mératique analogue à celle des pampas, ennoie des anciens reliefs à matériel secondaire et tertiaire. Cette formation est, elle aussi, contemporaine du sillar dont elle contient des intercalations.

ÉTUDE TECTONIQUE.

Les structures étudiées sont des failles uniquement. Des stries indiquent la direction et souvent le sens du mouvement. Une faille sera caractérisée par l'orientation de son plan, la direction et le « pitch » de la strie et le sens du déplacement relatif. Comme nous le verrons, la composante principale du mouvement est parallèle au plan de fracture (strie de glissement).

Ces divers éléments permettent de tracer les plans de mouvement relatifs à chaque strie (plans perpendiculaires à la faille et contenant la strie). L'ensemble des pôles des plans de mouvement dessine une ou plusieurs guirlandes qui permettent de déterminer la direction des axes de la déformation (ARTHAUD, 1969).

Nous avons mesuré 180 failles dans une carrière à l'Ouest d'Arequipa (Añashuayco) une vingtaine à Yura (NW d'Arequipa) et dans la vallée du Rio Impertinente (W d'Arequipa). Dans ces deux dernières stations, à quelques kilomètres d'Arequipa, nous avons mesuré des failles ayant les mêmes caractéristiques que celles de la première carrière et se trouvant dans le même matériel. Aussi les avons-nous incluses dans le même diagramme, leur nombre insuffisant ne permettant pas de faire une étude statistique pour chaque affleurement pris isolément.

Ces failles se présentent sous forme de grands miroirs d'une dizaine de mètres carrés en moyenne, subverticaux, généralement plans, rarement courbes. On note parfois entre deux blocs la présence de brèche tectonique de quelques millimètres à quelques centimètres d'épaisseur. En raison du peu de résistance de la roche aux facteurs climatiques, une partie des stries est mal conservée ; mais il est toujours possible d'en observer de très nettes sur chaque miroir. Le rejet n'est pas mesurable par manque de repères, mais il reste inférieur à l'épaisseur de la série (100 à 150 m).

Dans la région de Moquegua, dans la tranchée de la route pan-américaine, au km 1130, nous avons observé une dizaine de failles. Les miroirs se suivent sur plusieurs mètres de longueur et sur plusieurs dizaines de mètres carrés. Cependant, en surface, ils sont cachés par une épaisse couche de produits d'altération. En dehors de la tranchée les failles ne sont visibles que sous forme de petits vallons qui se suivent sur 50 à 90 m. Ici non plus nous n'avons pas de repères stratigraphiques suffisamment nets pour apprécier les rejets. La série reste généralement

subhorizontale des deux côtés de la faille ; toutefois dans la partie nord de la coupe, elle est basculée vers l'W avec un pendage de 21°.

L'étude des failles de ces deux stations de mesures montre que leur pendage varie de 65 à 90° avec un maximum entre 80 et 90° (fig. 3). Les stries sont subverticales, le « pitch » variant de 70 à 90° (fig. 4). Sur diagramme (fig. 5) les pôles des failles se répartissent à peu près sur toute la circonférence, avec cependant trois directions plus marquées (fig. 6) :

- Une NE - SW,
- Une N - S,
- Une E - W.

Sur le diagramme de la figure 7, les plans de mouvement se répartissent suivant une guirlande horizontale (plan moyen contenant les pôles des plans de mouvement). Un maximum est à noter dans la direction N 40 ; ce maximum n'est pas significatif et ne peut pas servir à déterminer un des axes de la déformation. En effet, il est à 90° du maximum des pôles de failles. Étant donné que l'on a un maximum de failles dans une direction, il est normal que les plans de mouvement, se rapportant à ces failles, se regroupent autour d'un maximum perpendiculaire à celui des failles.

A partir de cette guirlande horizontale, il n'est pas possible, géométriquement, de définir les trois axes de la déformation. Seul un axe vertical existe. On ne peut pas mettre en évidence une direction de compression ou d'extension horizontale, et donc une seule direction de déplacement vertical est déterminée. C'est un cas limite de mouvements verticaux accompagnés d'un allongement infime dans toutes les directions.

Toutefois, parmi l'ensemble des failles étudiées, il en existe qui s'écartent du plan vertical (pendage de 65-70°) ; dans ce cas, ce sont toujours des failles normales. Le bloc diagramme de la figure 8 schématise la dislocation suivant des plans verticaux.

Outre l'emploi des méthodes graphiques d'Arthaud, les données ont été reprises par le calcul grâce au modèle de déformation défini par E. CAREY et B. BRUNIER (1974). La méthode consiste à chercher un tenseur des contraintes qui rende compte de la déformation. Les stries représentent la contrainte tangentielle appliquée au plan de faille du fait du tenseur des contraintes. Trois méthodes de calcul (c'est-à-dire trois programmes mathématiques différents) ont été employées (CAREY, 1975 et thèse à paraître, Université d'Orsay).

Ces trois méthodes déterminent toutes un ellipsoïde des contraintes de révolution autour de l'axe vertical.

En appliquant le tenseur calculé au plan de faille réel, on calcule les stries théoriques que produirait le tenseur des contraintes sur ces plans de failles.

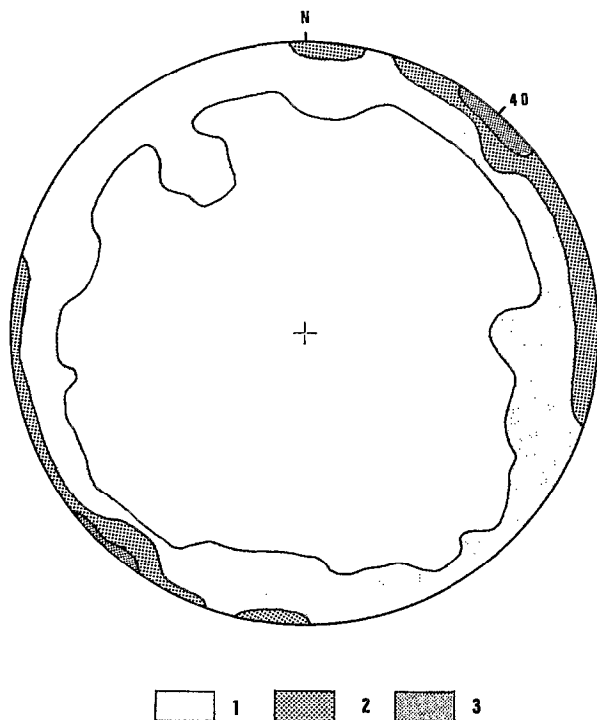


Fig. 7. — Diagramme de densité des pôles des plans de mouvement.
1 : 0 à 5 % ; 2 : 5 à 11 % ; 3 : 11 à 18 %.

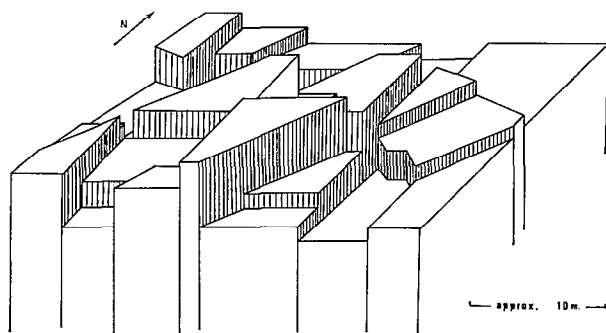


Fig. 8. — Bloc diagramme schématisant la déformation.

On peut alors comparer les stries théoriques ainsi calculées aux stries mesurées : 6 % seulement des stries calculées s'écartent de plus de 15 % de la strie observée.

La guirlande des pôles des plans de mouvement permet de déterminer l'axe de révolution de l'ellipsoïde des contraintes ; les hypothèses des modèles mécaniques d'ARTHAUD (1969) et de CAREY et BRUNIER (1974) impliquent la superposition des

directions principales des contraintes et des déformations. C'est le même axe de révolution vertical qui est donné par les deux méthodes.

De même que la méthode d'Arthaud ne permettait pas de préciser la position des deux axes dans le plan horizontal, le calcul montre également que l'ellipsoïde étant de révolution, il n'est pas possible de les déterminer. Les structures observées ne permettent pas de mettre en évidence une direction d'extension préférentielle.

Étant donné qu'il n'y a pas ou peu d'extension dans le plan horizontal, nous sommes en présence, localement, de mouvements purement verticaux. Ces mouvements de blocs en piston pourraient être dus à des montées de corps intrusifs « en bulle » ayant pour effet en surface des réajustements se traduisant par des déplacements verticaux.

Ceci s'accorde bien avec l'hypothèse d'HAMILTON (1969) qui pense que la mise en place de la couverture volcanique calco-alcaline du Sud du Pérou s'accompagne de la montée d'intrusions comagmatiques.

CONCLUSION.

Nous venons d'étudier une tectonique originale qui ne fait apparaître que des mouvements purement verticaux avec une extension très faible et non orientée dans le plan horizontal. A notre connaissance il n'existe pas d'exemple de ce genre déjà décrit.

Nous pouvons ainsi résumer les principales caractéristiques de cette tectonique :

- Dans le bassin d'Arequipa, les failles que nous avons mesurées présentent la particularité d'avoir des miroirs verticaux où les stries sont elles aussi verticales. Elles se répartissent *dans toutes les directions* avec un léger maximum N 40, qui peut être la conséquence de failles préexistant dans le substratum.

- Dans les localités étudiées, nous n'avons pas trouvé de failles en compression.

- Les mouvements verticaux le long de ces failles verticales ont pu être causés par la montée d'un corps intrusif en profondeur.

- D'autres observations moins détaillées font penser que ce même système de failles plio-quaternaires se prolonge dans la région de Moquegua avec des caractéristiques semblables.

- Les résultats obtenus portent sur une région limitée du Sud péruvien, dans laquelle le système étudié semble homogène. Étant donné le peu d'études effectuées tant au N qu'au S, il serait imprudent de vouloir étendre nos conclusions à d'autres régions.

REMERCIEMENTS.

Je tiens à remercier tout particulièrement les différents organismes dont le soutien financier et matériel m'a permis de réaliser ce travail :

— La Direction générale de la Coopération technique du Ministère des Affaires Étrangères,

— L'Office de la Recherche scientifique et technique outre-mer,

— La « Universidad Nacional de San Agustín » d'Arequipa,

— L'Institut français des Études andines à Lima,

— Le Laboratoire de Géologie dynamique interne d'Orsay et plus particulièrement E. CAREY et D. SOREL.

Manuscrit reçu au S.C.D. de l'O.R.S.T.O.M. le 5 novembre 1975.

BIBLIOGRAPHIE

- ARTHAUD (F.), 1969. — Méthode de détermination graphique des directions de raccourcissement, d'allongement et intermédiaire d'une population de failles. *Bull. Soc. géol. Fr.*, (7), XI : 729-737.
- ARTHAUD (F.) et CHOUKROUNE (P.), 1972. — Méthode d'analyse de la tectonique cassante à l'aide des microstructures dans les zones peu déformées. Exemple de la plate-forme Nord-Aquitaine. *Rev. Inst. Fr. Pérol.*, vol. 27, 5 : 715-732.
- 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. Géog. phys. et Géol. dyn.*, XV (1-2) : 73-114.
- BARNES (V. E.), EDWARDS (G.), Mc LAUGHLIN (W. A.), FRIEDMAN (I.) et JOENSUU (O.), 1970. — Macusanite occurrence, age and composition, Macusani, Peru. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 81 (5) : 1539-1546.
- BELLIDO (E.) et GUEVARA (C.), 1963. — Geología de los cuadrangulos de Punta de Bombon y Clesesi. *Com. Carta Geol. Nac., Bol.* 5, Lima.
- BOUSQUET (J. C.), 1972. — La tectonique récente de l'Apennin Calabro-Lucanien dans son cadre géologique et géophysique. Thèse U.S.T.L., Montpellier.
- CAREY (E.), 1975. — Méthode numérique d'approche d'un tenseur moyen pour une population de failles. 3^e Réunion annuelle des Sciences de la Terre, Montpellier.
- CAREY (E.), 1975. — Thèse à paraître à l'Université d'Orsay.
- 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.Ac.Sc.*, Paris T 279 : 891-894.
- DALMAYRAC (B.), 1974. — Un exemple de tectonique vivante : les failles subactuelles du pied de la Cordillère blanche (Pérou). *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. géol.*, vol. VI, N° 1 : 19-27.
- DOLLFUS (O.), 1965. — Les Andes centrales du Pérou et leurs piémonts, étude géomorphologique. *Trav. Inst. fr. Étud. Andines*, t. X, 404 p., Lima.
- DOLLFUS (O.) et MÉGARD (F.), 1968. — Les formations quaternaires du bassin de Huancayo et leur néotectonique (Andes centrales péruviennes). *Rev. Geogr. phys. Geol. dyn.*, X (5) : 429-440, Paris.
- EVERNDEN (J.), KRIS (S. J.) et CHERRONI (C.), 1966. — Correlaciones de las formaciones terciarias de la cuenca altiplánica a base de edades absolutas determinadas por el método Potarico-Argon. *Serv. Geol. Bolivia. Hoja Informativa N° 1*, La Paz.
- HAMILTON (W.), 1969. — The volcanic central Andes. A modern model for the cretaceous batholiths and tectonics of Western North America. In *Proceedings of the Andesite Conference A.R. Mc Birney Editor. State of Oregon, Department of geology and mineral Industries. Bull.* 65.
- JENKS (W. F.), 1948. — Geología de la hoja de Arequipa. *Inst. Geol., Peru, Bol.* N° 9.
- JENKS (W. F.) et GOLDICH (S. S.), 1956. — Rhyolitic tuff flows in southern Peru. *The Journal of Geology*, Vol. 64, n° 2 : 156-172.
- LAHARIE (R.) et DERRUAU (M.), 1974. — La morphogenèse des Andes du Sud du Pérou. *Rev. de Géog. Alp.*, T 62, fasc. 4 : 474-505.
- LAVENU (A.) et SOULAS (J. P.), 1974. — Observations de microfailles plioquaternaires en distension le long de la côte Sud du Pérou. *Bull. I F E A*, III n° 2 : 39-48.
- LEFÈVRE (C.), 1973. — Les caractères magmatiques du volcanisme plioquaternaire des Andes dans le Sud du Pérou. *Contr. Mineral. and Petr.*, 41, p. 259-272, Springer-Verlag.
- MÉGARD (F.), 1973. — Étude géologique d'une transversale des Andes au niveau du Pérou central. Thèse U.S.T.L., Montpellier, 263 p.
- PEGORARO (O.), 1972. — Application de la microtectonique à une étude de néotectonique. Le golfe Maliaque (Grèce centrale). Thèse 3^e cycle U.S.T.L., Montpellier.
- SALAS (R.), KAST (R. F.), MONTESINOS (F.) et SALAS (I.), 1966. — Geología y recursos minerales del departamento de Arica. *Bol. Inst. Invest. Geol.*, 21, 174 p., 5 pl. et une carte h. t., Santiago de Chile.
- TRICART (J.), DOLLFUS (O.) et CLOOTS-HIRSCH (A. R.), 1969. — Les études françaises sur le quaternaire Sud américain. VIII^e Congrès int. de l'INQUA, Paris.
- VARGAS (L.), 1970. — Geología del cuadrangulo de Arequipa. *Serv. Geol. Minería, Bol.* 24, Lima.