

Premiers résultats sur la sismicité de la Cordillère Blanche (Hautes Andes du Pérou central)

Jacques DEVERCHÈRE ⁽¹⁾

Résumé : La Cordillère Blanche, située dans la Cordillère Occidentale du Pérou central, présente sur sa bordure ouest un impressionnant système de failles normales continu sur 200 km. En dépit de traces évidentes en surface d'une activité récente, aucun grand séisme historique n'y a été relevé. Un réseau dense de 11 sismographes à enregistrement analogique a été installé autour de cette Cordillère et maintenu pendant 35 jours afin de connaître l'activité microsismique superficielle. L'étude présente porte sur 47 événements enregistrés en 15 jours : tous sont superficiels (0 à 15 km) et ont des magnitudes variant de 0 à 3. L'activité sismique est concentrée près d'un segment central de la faille bordière et se manifeste de part et d'autre de celle-ci. Les premiers mécanismes au foyer déterminés témoignent d'un régime tectonique extensif.

Mots-clés : Sismotectonique - Pérou - Faille active - Andes Centrales - Mécanisme au foyer - Modèle de vitesse.

Abstract : First results on seismicity of the Cordillera Blanca (High Andes of Central Peru). The Cordillera Blanca, in the western Cordillera of central Peru, is bounded to the West by a huge, very continuous normal faults system on 200 km long. In spite of some evident recent activity, no great historical earthquake has been reported there. A dense microseismic network has been set up around this chain during 35 days in order to identify superficial microseismicity. Only 47 events recorded during 15 days are studied here : all are superficial (0 to 15 km depth) and have magnitudes extending from 0 to 3. The seismic activity is concentrated near a central zone of the main fault and occurs on both side of it. The first focal mechanisms show an extensional tectonic regime.

Key words : Seismotectonics - Peru - Active fault - Central Andes - Focal mechanism - Velocity model.

Resumen : Primeros resultados sobre la sismicidad de la Cordillera Blanca (altas andes del Peru central). El borde Oeste de la Cordillera Blanca, en la Cordillera occidental del Peru central, es limitado por un gran sistema de fallas normales muy continuo sobre 200 km. Hay evidencias de su actividad actual ; sin embargo no ocurrieron grandes sismos historicos en la zona. Una red densa de 11 sismografos fue instalada alrededor de esta cordillera y mantenida durante 35 días para conocer la actividad microsismica superficial. Este estudio concierne solamente 47 eventos locales grabados en 15 días : todos son superficiales (de 0 a 15 km) y tienen magnitudes variando de 0 à 3. La actividad sismica esta concentrada cerca de una zona central de la falla principal y se observa de cada lado de esta. Los primeros mecanismos focales determinados muestran un campo de esfuerzos extensivo.

Palabras claves : Sismotectonica -- Peru - Falla activa - Andes centrales - Mecanismo focal - Modelo de velocidad.

(1) Laboratoire de Géophysique (UA 730 du CNRS), Bâtiment 509, Université de Paris-Sud, 91405 Orsay.

INTRODUCTION

La Cordillère Blanche est une chaîne étroite de 200 km de long située au cœur de la Cordillère Occidentale du Pérou central (fig. 1). Elle est consti-

tuée d'un batholite d'âge Miocène supérieur, bordé à l'Ouest par un bassin subsident au Pliocène : le Callejon de Huaylas. Ces deux zones sont séparées par le plus grand système de failles normales connu au monde (DALMAYRAC, 1974 ; YONEKURA *et al.*, 1979) :

- | | | | |
|---|---|---|--|
|  | Terrains continentaux plio-quaternaires du bassin du Rio Santa |  | Batholite de la côte, Crétacé-Paléogène |
|  | Tuf Yungay et Ignimbrites Fortaleza Miocène term. - Pliocène inf. |  | Terrains sédimentaires et volcano-sédimentaires Mésozoïque |
|  | Batholite de la Cordillère Blanche Miocène sup |  | Terrains précambriens et paléozoïques |
|  | Formation volcanique Calipuy Oligo-Miocène | | |

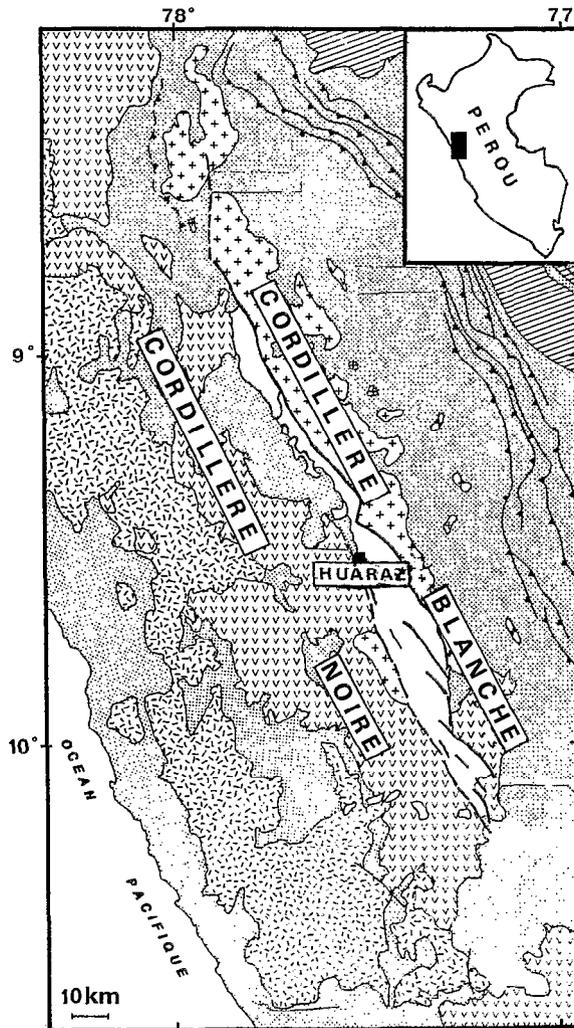


Fig. 1. — Carte géologique simplifiée de la région de la Cordillère Blanche. *d'après BONNOT (1984). Simplified geological map of the Cordillera Blanca region, after BONNOT (1984)*

la dénivelée maximum est de 3 500 m et le rejet vertical de 4 500 m environ depuis 5 millions d'années (BONNOT, 1984). Cette surrection différentielle a créé des reliefs d'une extrême vigueur constituant les points culminants des Andes centrales (nevado Huascarán, 6 768 m).

Dans le contexte général de convergence entre les plaques Nazca et Amérique du Sud, la Cordillère Blanche est donc un site d'observation privilégié pour comprendre l'état des contraintes dans la haute chaîne andine. Cependant, les interprétations du régime tectonique actuel divergent notablement : MÉGARD et PHILIP (1976) y voient une compression suivant une direction proche de celle du système de failles (N 35° W) ; DALMAYRAC et MOLNAR (1981) privilégient une extension perpendiculaire à la chaîne ; enfin, BONNOT (1984) et SÉBRIER (1985) attribuent la surrection quaternaire de 1 000 m à un régime extensif N-S. Toutes ces analyses reposent seulement sur des observations de surface, car en dépit de traces indiscutables d'activation post-holocène (BONNOT, 1984 ; SÉBRIER *et al.*, 1985), aucun grand séisme historique associé à ce système de faille n'a été reporté (SILGADO, 1978). Aussi nous avons réalisé en octobre-novembre 1985 une étude sismotectonique afin de connaître l'activité microsismique du système et de confronter ses résultats à ceux fournis par les analyses géologiques. Les objectifs immédiats sont de décrire la géométrie des zones actives, donner la profondeur des foyers et préciser la longueur des segments susceptibles d'être réactivés. A plus long terme, on pourra apporter une contribution à l'estimation du « creeping » et une meilleure définition de l'état des contraintes dans le contexte géodynamique de la Cordillère Occidentale.

ACQUISITION DES DONNÉES

Onze stations portables à enregistrement analogique (Sprengnether MEQ 800) ont été disposées autour de la Cordillère Blanche et ont fonctionné en continu pendant 35 jours. Nous avons utilisé des sismomètres MARK PRODUCTS de type L4-C (composante verticale, fréquence propre 1 Hz). La bande passante des amplificateurs a été fixée entre 0,3 ou 2 Hz et 30 Hz. Les gains sont de 84 dB sur l'ensemble du réseau, ce qui représente un seuil de détection élevé (GRANGE, 1983 ; DORBATH *et al.*, 1986). La vitesse d'enregistrement était de 60 mm/min et une mesure de la correction de temps a été faite toutes les 48 heures en utilisant le signal radio WWV. Les dérives des horloges étant faibles (au maximum une seconde en 35 jours) et régulières, les corrections sont bonnes, et en fonction de la précision des lectures l'erreur sur le temps d'arrivée des ondes P est finalement estimée à moins de 0,1 seconde.

Des études antérieures de l'Institut Géophysique du

Pérou ont montré l'existence d'une activité microsismique superficielle, notamment dans la région de Huaraz, mais celle-ci était très mal connue. La disposition du réseau (fig. 2) répond à un compromis entre la nécessité de couvrir une assez grande région et le souci d'obtenir une bonne précision sur les localisations. La distance moyenne entre les stations est ainsi de 20 à 25 km, mais seules les parties sud et centrale de la faille bordière sont convenablement couvertes, en raison des moyens d'accès et des impératifs logistiques.

L'activité sismique enregistrée est de l'ordre de 15 à 30 séismes quotidiens, dont la plus grande partie provient de la zone de subduction située à l'ouest du réseau et sous celui-ci. Cependant, on estime à plus de 150 les événements crustaux provenant de la région de la Cordillère Blanche, ce qui représente une activité importante. L'étude qui suit porte sur 47 d'entre eux enregistrés dans les 15 premiers jours.

STABILITÉ DES DÉTERMINATIONS

Origine des incertitudes

Le programme de détermination d'hypocentres utilisé est une version de HYPOINVERSE (KLEIN, 1978) comportant une correction d'altitude le long du rai. Il permet de choisir parmi 3 modèles de vitesse pour chaque station. La mise en œuvre de ce programme de calcul au Sud-Pérou (GRANGE, 1983) a prouvé sa fiabilité pour une étude microsismique fine à partir des données d'un réseau local. On a suivi dans ses grandes lignes la démarche de Grange. Pour une discussion plus extensive, voir par exemple GRANGE (1983) et ROECKER (1982).

Le poids attribué aux phases P est en général maximum ; pour les S, la précision varie de 0,10 à 1 seconde et leur poids est intermédiaire (1/2 ou 1/4). La position des stations est connue par carte à 300 m près environ.

On a reporté sur la figure 3 l'ensemble des couples (T_{pij}-T_{pimin} ; T_{sij}-T_{simin}) pour le séisme i et la station j, obtenus à partir des temps d'arrivée pour chaque séisme. Plus de 400 points sont ainsi sélectionnés et donnent par régression linéaire une valeur de V_p/V_s égale à 1,70 ± 0,01. C'est cette valeur qui a servi au calcul des hypocentres. Elle correspond à celle trouvée par GRANGE (1983) pour la sismicité superficielle au Sud-Pérou.

Le modèle de vitesse choisi conditionne fortement la qualité des déterminations : une méthode d'inversion simultanée des hypocentres et de la structure de vitesse est souhaitable mais entraîne des calculs complexes en l'absence d'hypothèses de départ (PAVLIS et BOOKER, 1980 ; ROECKER, 1982). Compte tenu du nombre de données traitées ici, on a préféré procéder par essais successifs.

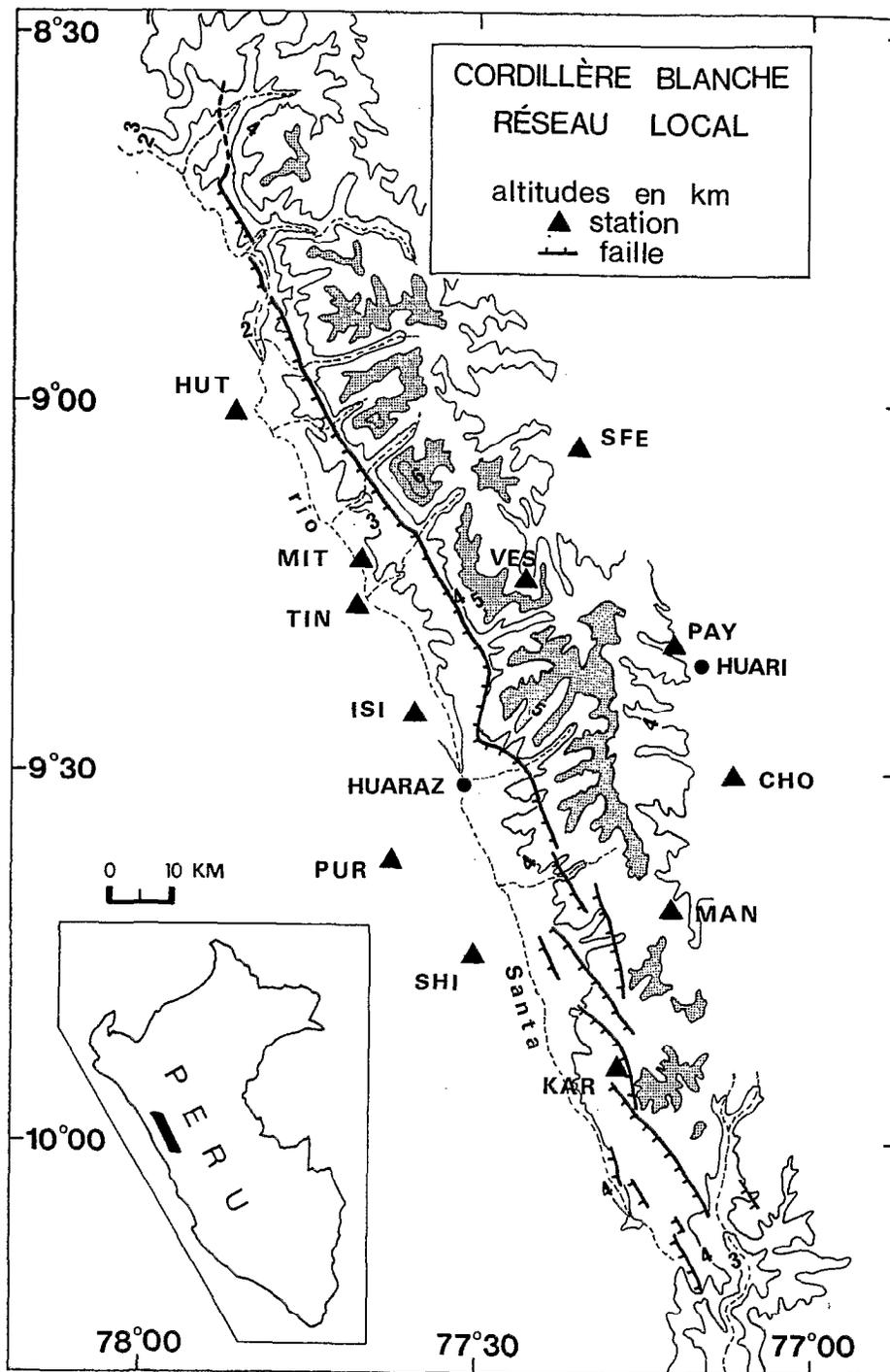


Fig. 2. — Carte de localisation des 11 stations analogiques de la Cordillère Blanca. La station TIN a fonctionné du 11/10/85 au 31/10/85 et la station MIT du 01/11/85 au 13/11/85. Location map of the 11 analogic stations of the Cordillera Blanca. Station TIN worked from 11/10/85 to 31/10/85 and station MIT from 01/11/85 to 13/11/85

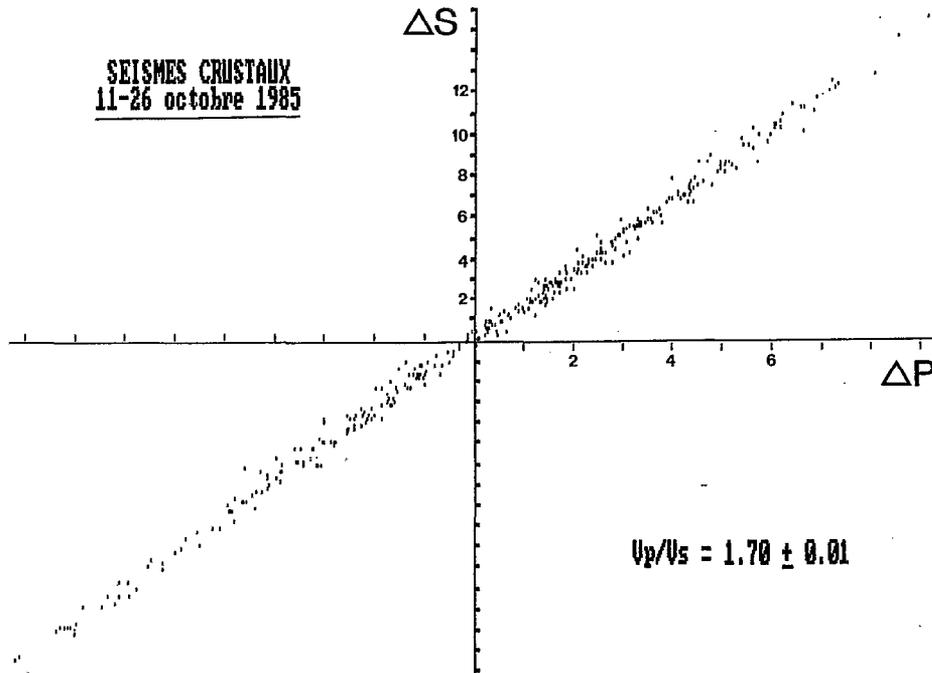


Fig. 3. — Diagramme des $\Delta s = T_{sij} - T_{smin}$ en fonction des $\Delta p = T_{pij} - T_{pmin}$ (en secondes) pour les 47 séismes (i) correctement déterminés. (j) désigne les stations. Plots of $\Delta s = T_{sij} - T_{smin}$ versus $\Delta p = T_{pij} - T_{pmin}$ (in sec.) for the 47 well located events (i). (j) is for stations

Tests sur les modèles de vitesse

On a choisi une altitude de référence des modèles égale à 2 600 m, qui est l'altitude de la plus basse station du réseau. La stabilité des solutions en profondeur s'est trouvée logiquement améliorée pour les événements les plus superficiels. La correction d'altitude s'effectue alors pour les autres stations à partir de cette altitude de référence.

On a testé 4 modèles de vitesse (tabl. I) inspirés des structures crustales (peu précises) connues au Pérou (JAMES, 1971 ; OCOLA et MEYER, 1972). Le modèle MOD. 1 est identique de chaque côté de la faille. Les autres utilisent deux distributions de vitesse : MOD. 2 privilégie la géologie en surface, MOD. 3 la limite marquée par la faille ; MOD. 4 simule grossièrement le bassin du Callejon de Huayllas (WILSON *et al.*, 1967 ; BONNOT, 1984). Des tests ont été réalisés sur 10 séismes de qualité différente qui constituent un échantillonnage représentatif de la sismicité crustale. Ils montrent que les solutions obtenues à partir de ces 4 modèles sont stables : l'incertitude réelle peut être

estimée au maximum à 3 km en position épiscopentrale et 5 km en profondeur. Les meilleurs résultats ont été obtenus à partir de MOD. 4, qui a été par la suite affiné. Le modèle résultant utilisé pour les calculs est MODFIN (fig. 4). Dans ce modèle, l'influence du bassin n'existe que pour les 4 stations du N-W.

Tableau I

Les quatre modèles de vitesse testés
The four tested velocity models

MOD. 1	MOD. 2		MOD. 3		MOD. 4	
	SHI, KAR CHO, VES	Autres	Ouest	Est	Ouest	Est
km km/s	km km/s	km km/s	km km/s	km km/s	km km/s	km km/s
0 5.9	0 5.7	0 5.0	0 5.4	0 5.6	0 5.0	0 5.9
8 6.2	8 6.2	4 5.8	10 6.2	8 6.2	4 5.9	6 6.2
25 6.7	25 6.7	10 6.2	25 6.2	25 6.2	10 6.2	21 6.2
48 8.1	50 8.1	25 6.7	50 6.8	50 6.8	25 6.2	48 6.8
		50 6.7	50 8.0	50 8.0	25 6.8	48 8.0
		50 8.1			50 8.0	

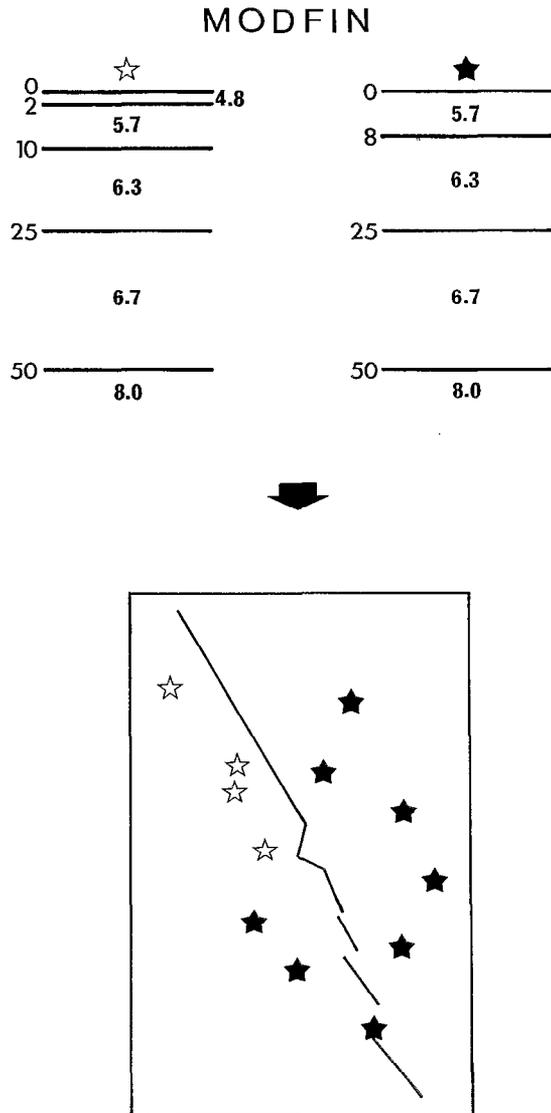


Fig 4. — Couple de modèles choisis après les tests pour la détermination des 62 événements crustaux.

Couple of models chosen after the tests to determine the 62 crustal events

Sélection des événements

Plusieurs critères simultanés sont employés pour trier les séismes (GRANGE, 1983 ; DORBATH *et al.*, 1986 ; CUNNINGHAM *et al.*, 1986). Ici, les suivants ont été retenus : moyenne quadratique des résidus (RMS) inférieure à 0,4 seconde, erreurs mathématiques ERH et ERZ inférieures à 5 km, nombre de phases P supérieur à 4, nombre de phases S supérieur à 2, distance à la plus proche station inférieure à deux fois la profondeur. On a tenu compte de la stabilité des

déterminations en limitant le rapport des valeurs propres extrêmes de la matrice des dérivées partielles à 100. Ce critère est plus sélectif que celui habituellement utilisé (CUNNINGHAM *et al.*, 1986).

Sur 62 séismes traités, 34 répondent à ces critères (classe A) et 13 autres sont conservés en fixant la limite de ERZ à 10 km (classe B). On a pris soin de situer par rapport aux autres les 15 événements éliminés afin de vérifier si on ne néglige pas, éventuellement, une famille représentative.

Qualité des mécanismes au foyer

Le type d'onde (directe ou réfractée) dépend étroitement du modèle retenu (CROSSON, 1976). On a pu voir que ce problème affecte peu la qualité des déterminations. Par contre, il peut modifier la position des intersections du rai et de la sphère focale, et de ce fait les mécanismes au foyer.

On a alors testé un séisme type sur les 5 modèles précédents (fig. 5) : certains points sont déplacés mais la solution reste fondamentalement la même. Une étude sur les 10 séismes choisis donne des résultats semblables. Si l'on dispose de suffisamment de points, on contraindra donc correctement les mécanismes, en dépit de l'incertitude sur certains trajets due au caractère discontinu des modèles.

RÉSULTATS

Répartition des séismes

La carte de la figure 6 montre : 1) une sismicité diffuse au sud, sans géométrie nette, si ce n'est un allongement suivant le système de failles ; 2) une absence de sismicité au nord ; 3) deux groupes d'événements au centre (nord de Huaraz) de part et d'autre de la faille et alignés dans sa direction sur 35 km.

La coupe de la figure 7 portant sur la sismicité du segment central montre que l'activité ne s'étend pas au-delà de 15 km de profondeur. Cette situation contraste nettement avec celle observée en zone subandine, où les profondeurs atteignent 30 km (DORBATH *et al.*, 1986). L'escarpement de la faille bordière a un pendage de 45° : les séismes du groupe ouest semblent donc être en majorité dans le bloc affaissé, et s'approfondissent vers l'ouest. Il n'y a pas d'activité à la verticale du bassin du Callejon de Huaylas, peut-être en raison de l'incompétence de ses dépôts plio-quadernaires.

A l'est, à la verticale des hauts sommets, on trouve une activité comparable qu'on ne peut mettre à priori en relation avec des failles connues en surface. Nos résultats mettent donc en évidence une déformation importante en arrière de la faille bordière, phénomène qui était totalement ignoré jusqu'ici.

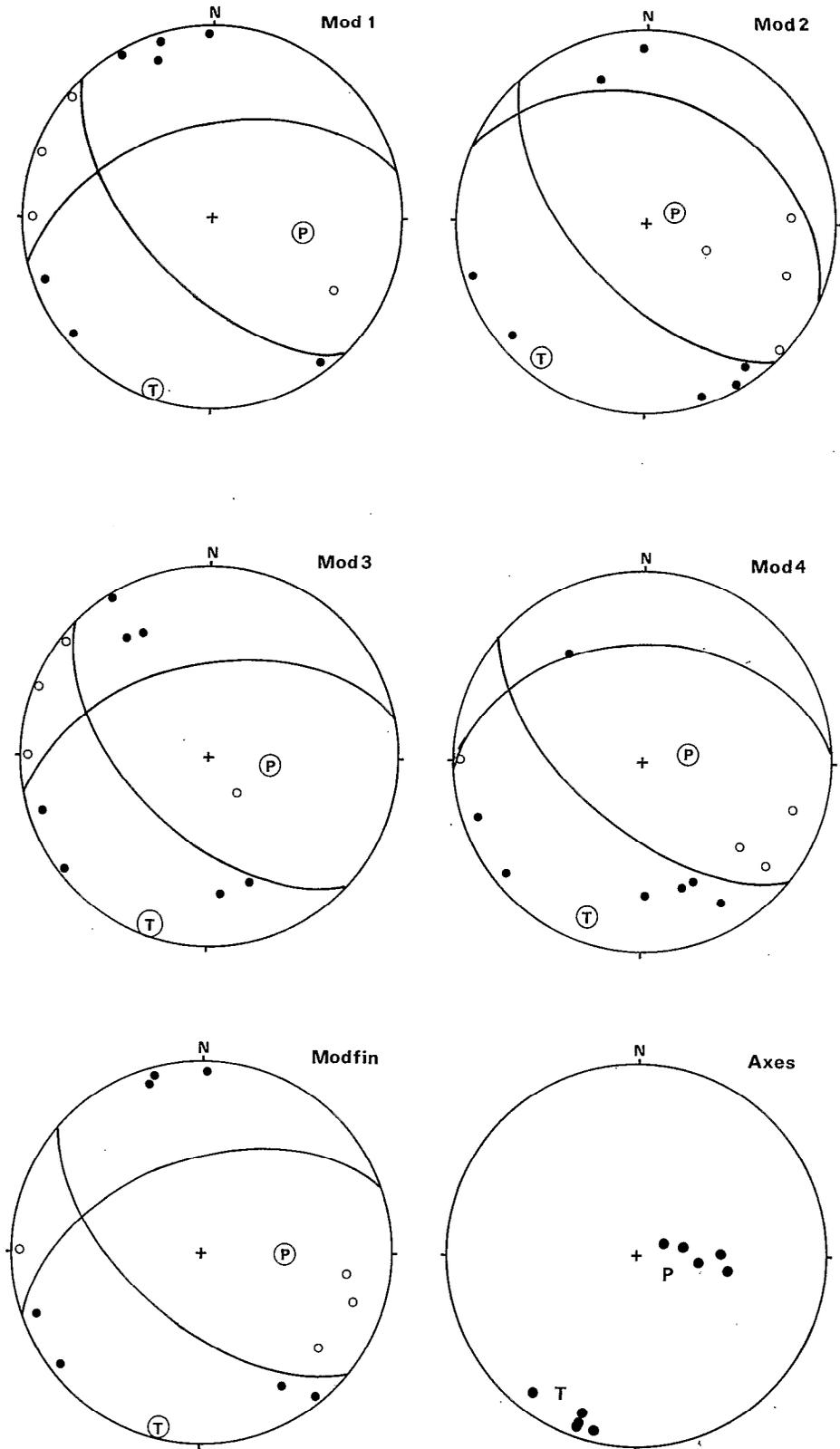


Fig. 5. — Différents mécanismes au foyer du séisme du 19/10/85 à 01 h 25 construits pour chacun des modèles proposés (voir tableau I et fig. 4). On a porté sur un stéréodiagramme les axes de pression (P) et de tension (T) des 5 mécanismes. Projection de Schmidt. Rond noir : compression ; rond blanc : dilatation

Different local mechanisms of the 19/10/85 event at 01:25 using each model (see table I and fig. 4). We plot on a stereonet the compressional (P) and tensional (T) axes of the 5 mechanisms. Schmidt projection. Solid circles are compression and open circles are dilatation first motions

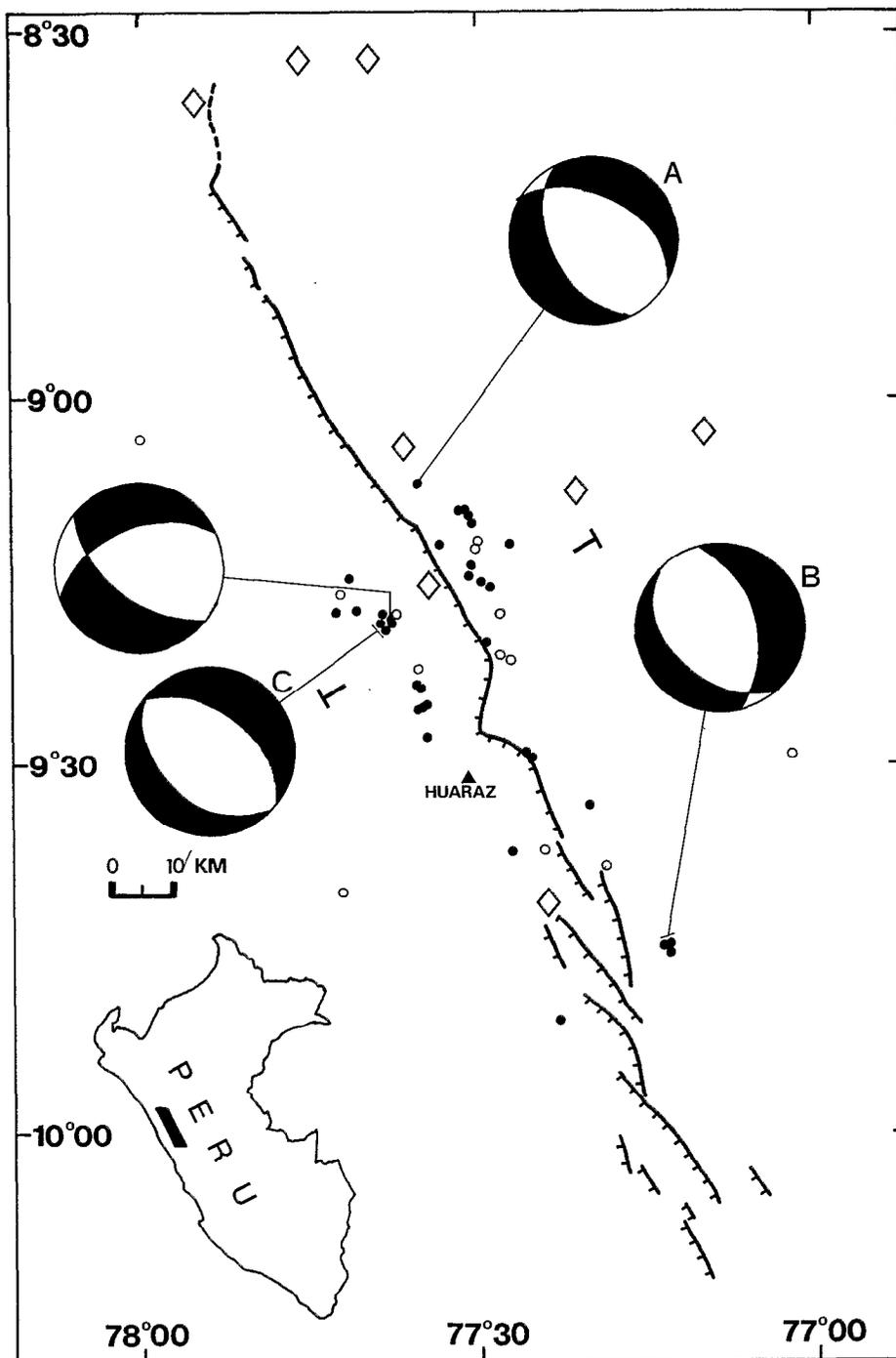


Fig. 6. — Carte des épicentres de 47 séismes crustaux. En noir figurent les événements les mieux déterminés (classe A), en blanc ceux de la classe B (voir texte). Les losanges sont les épicentres des 8 séismes historiques et instrumentaux mentionnés jusqu'en 1976. d'après SILGADO (1978) et l'Institut Géophysique du Pérou (1977). On a porté les 4 mécanismes au foyer de la figure 8. Les (T) marquent l'emplacement de la coupe de la figure 7.

Seismicity map of 47 crustal events. Solid circles are best determined ones (class A), open circles are class B ones (see text). Diamond-shaped symbols are historical and instrumental seismicity till 1976 mentioned by SILGADO (1978) and Instituto Geofisico del Peru (1977). The 4 focal mechanisms are those of figure 8. The (T) locate the cross-section of figure 7.

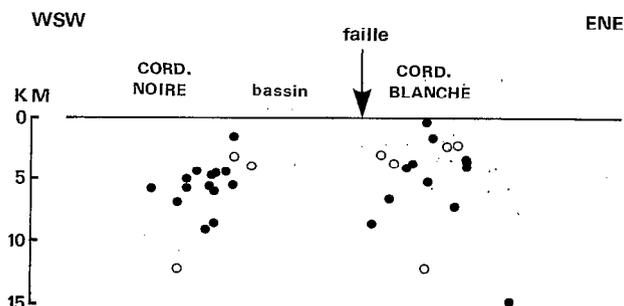


Fig 7. — Coupe sismique portant sur les 34 séismes déterminés au centre du réseau. La flèche marque l'emplacement de la faille bordière. Échelles verticale et horizontale identiques. En noir : classe A ; en blanc : classe B. L'erreur mathématique sur la profondeur est de l'ordre de 5 km (voir texte).

Cross-section with 34 events located in the center of the network. The array shows the fault trace. Vertical and horizontal scales are equal. Solid circles : class A ; open circles : class B. Standard error on depth is about 5 km (see text).

Par ailleurs, il faut noter que ces deux groupes de sismicité sont situés de part et d'autre du même segment de la faille principale et que leur position coïncide avec un changement net de direction de la trace en surface. Il serait intéressant d'étudier la relation entre cette aspérité géométrique et la sismicité (AKI, 1984 ; SANDERS et KANAMORI, 1984).

La très faible sismicité historique et instrumentale d'origine crustale est également représentée sur la figure 6 (losanges). Une part importante est proche de la zone d'activité intense déterminée ici. Rappelons que le plus grand séisme crustal historique enregistré par le réseau mondial dans la région est celui de Quiches du 10 novembre 1946, à 60 km au N-E de la Cordillère Blanche (SILGADO, 1951 ; HODGSON et BREMNER, 1953). Bien qu'il soit difficile à interpréter, il confirme également l'importance des phénomènes tectoniques sur le versant est de la Cordillère Blanche.

Mécanismes au foyer

Nous présentons seulement ici 2 mécanismes simples et 2 mécanismes composites réalisés sur des paires de séismes (fig. 8). Ils sont schématisés et situés sur la carte de la figure 6 et sont déterminés en partie avec les méthodes de UDIAS *et al.* (1982), et en partie graphiquement. La composition des plans nodaux et des axes de contraintes est définie à 15° près. Tout quatre montrent sans ambiguïté un régime tectonique extensif et ont un plan nodal dans la direction des structures, avec un pendage proche de celui de la faille. A l'ouest, l'un des mécanismes est purement normal (C) et se trouve dans le bloc af-

faissé. L'autre (Modfin) est normal décrochant sénestre et est situé près du prolongement de la faille en profondeur. Il est en bon accord avec les observations microtectoniques faites dans ce secteur (BONNOT, 1984). L'axe de tension T est situé entre 8°N et 40°N suivant les mécanismes (fig. 8). Pour les mécanismes à l'est (A et B), on ne dispose pas d'observation de surface permettant de choisir le plan de faille. Cependant, les directions restent celles du système et la composante décrochante est faible pour ces séismes situés en dehors du groupe central. Enfin, leur direction d'extension se rapproche de NE-SW (fig. 8).

État des contraintes

Dans la Cordillère Blanche, l'observation néotectonique montre clairement qu'au Pliocène, l'extension a fonctionné dans une direction grossièrement E-W, provoquant des rejets verticaux sur la faille bordière de plus de 3 000 m (BONNOT, 1984). DALMAYRAC et MOLNAR (1981) expliquent cette extension perpendiculaire à la haute chaîne par des forces dues à la présence du relief et de la racine crustale dans le contexte de convergence. D'autre part, BONNOT (1984) met en évidence une extension N-S agissant depuis le Quaternaire ancien. Sur la base du même effet de la haute topographie compensée, SÉBRIER *et al.* (1985, 1987) donnent une explication légèrement différente qui leur permet d'intégrer cette extension N-S dans la Cordillère Occidentale des Andes Centrales. Nos données préliminaires ne permettent pas de trancher entre les deux interprétations proposées. Mais on peut déjà discuter des hypothèses que SCHWARTZ (1983) a proposé pour le calcul de la magnitude d'un séisme susceptible de réactiver le système. Comme il l'a supposé, la profondeur des foyers est bien de l'ordre de 15 km ; mais la longueur de rupture serait plutôt d'environ 30 km, alors qu'il l'estimait entre 35 et 85 km.

CONCLUSION

Une activité microsismique dans la Cordillère Blanche est pour la première fois localisée avec précision grâce aux enregistrements obtenus lors d'une campagne sismologique. Nos premiers résultats montrent que :

— cette sismicité se caractérise par de nombreux événements essentiellement répartis près d'un segment de la faille bordière en deux groupes allongés dans la direction de la chaîne. L'un se situe à l'ouest mais plutôt au-dessus du prolongement de la faille en profondeur, alors que l'autre est dans la haute chaîne à l'est et révèle une activité tectonique totalement inconnue jusqu'ici. Ce fait nouveau amène à modifier la conception géodynamique que l'on avait de cette partie des hautes Andes ;

- les profondeurs des foyers ne dépassent pas 15 km, limite probable des domaines cassant et ductile dans la région ;
- le régime de contraintes déduit les premiers mécanismes au foyer est distensif dans des directions qui varient suivant leur localisation de 10° E à 45° E ;
- cette distribution associée à la présence d'une

aspérité géométrique donne des informations sur certains caractères d'un grand séisme pouvant réactiver ce système.

L'ensemble de ces données permet de préciser les mécanismes qui sont à l'origine de cette chaîne spectaculaire et plus globalement de la Cordillère Occidentale dans le contexte géodynamique de la subduction.

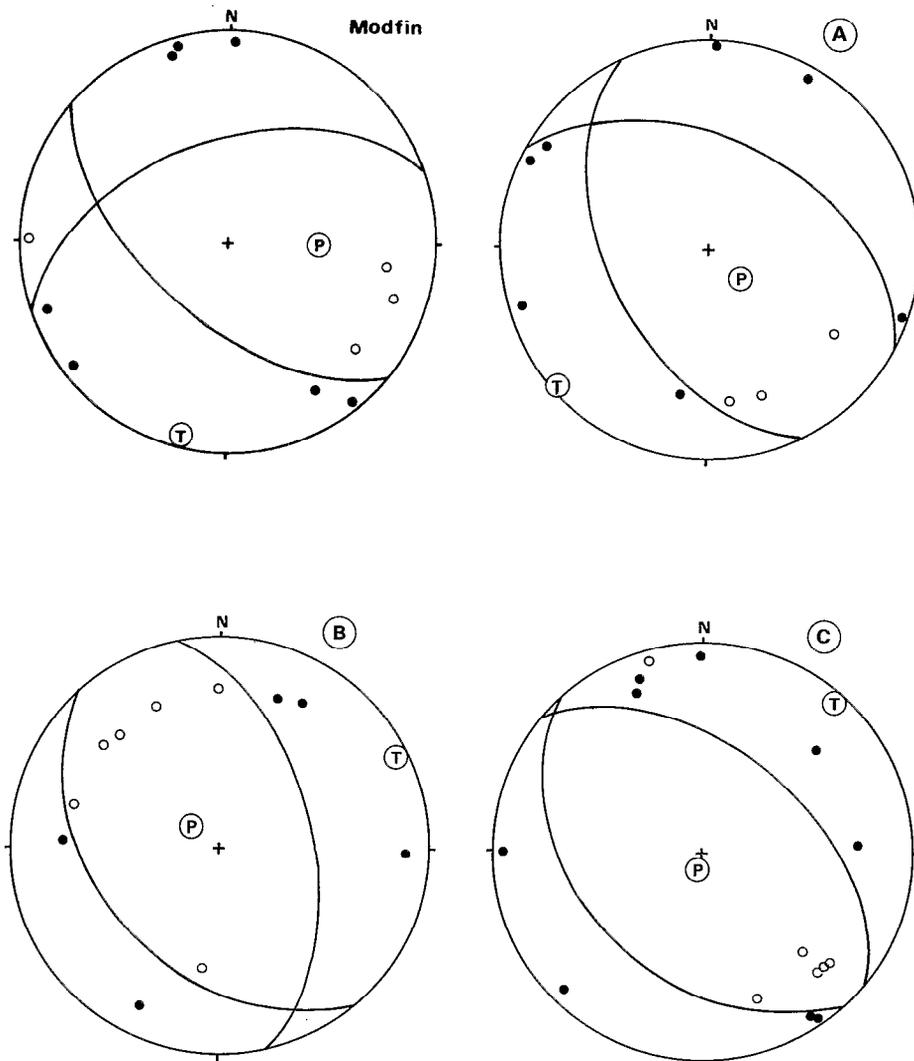


Fig 8. — Mécanismes au foyer simple (Modfin et A) et composites (B et C) portant sur 6 séismes. Les conventions sont celles de la figure 5. Ces 4 mécanismes sont localisés sur la carte de la figure 6. Simple (Modfin and A) and multiple (B, C) focal mechanisms on 6 events. Conventions are those of figure 5. These 4 mechanisms are located on figure 6

Remerciements

Cette étude fait partie d'un programme de coopération développé entre l'ORSTOM et l'Institut Géophysique du Pérou, auquel sont associés l'Université Paris-Sud (Orsay) et l'I.P.G. Strasbourg. Je remercie particulièrement Catherine et Louis DORBATH qui ont participé à l'organisation et au déroulement de la campagne et m'ont aidé de leurs conseils. L'ORSTOM a fourni les moyens

logistiques. Ont également participé au travail de terrain : Johnny TAVERA, Reynaldo HANCO, Alcides GARRO (I.G.P.), José BERROSPÍ (ORSTOM) et Isabelle CARLIER. Ce manuscrit a bénéficié des commentaires avisés de Catherine DORBATH et Jean-Claude RUEGG. Enfin, merci à Philippe DEVERCHÈRE pour son aide en informatique.

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 15 janvier 1988.

BIBLIOGRAPHIE

- AKI (K.), 1984. — Asperities, barriers, characteristic earthquakes and strong motion prediction. *J. Geophys. Res.*, vol. 89, B7 : 5867-5872.
- BONNOT (D.), 1984. — Néotectonique et tectonique active de la Cordillère Blanche et du Callejon de Huaylas (Andes nord-péruviennes). Thèse 3^e cycle, Univ. Paris-Sud, Orsay.
- CROSSON (R.S.), 1976. — Crustal Structure modeling of earthquake data : simultaneous least square estimation of hypocenter and velocity parameters. *J. Geophys. Res.*, vol. 81, 17 : 3036-3046.
- CUNNINGHAM (P.S.), ROECKER (S.W.) and HATZFELD (D.), 1986. — Three-dimensional P and S wave velocity structures of Southern Peru and their tectonic implications. *J. Geophys. Res.*, vol. 91, B9 : 9517-9532.
- DALMAYRAC (B.), 1974. — Un exemple de tectonique vivante : les failles subactuelles du pied de la Cordillère Blanche (Pérou). *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*, vol. 6, 1 : 19-27.
- DALMAYRAC (B.) and MOLNAR (P.), 1981. — Parallel thrust and normal faulting in Peru and constraints on the state of stress. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 55 : 473-481.
- DORBATH (C.), DORBATH (L.), CISTERNAS (A.), DEVERCHÈRE (J.), DIAMENT (M.), OCOLA (L.) and MORALES (M.), 1986. — On crustal seismicity of the Amazonian foothill of the Central Peruvian Andes. *Geophys. Res. Lett.*, vol. 13, 10 : 1023-1026.
- GRANGE (F.), 1983. — Étude sismotectonique détaillée de la subduction lithosphérique au Sud Pérou. Thèse 3^e cycle, I.R.G.M., Univ. Grenoble.
- GRANGE (F.), HATZFELD (D.), CUNNINGHAM (P.), MOLNAR (P.), ROECKER (S.W.), SUAREZ (G.), RODRIGUEZ (A.) and OCOLA (L.), 1984. — Tectonic implications of the microearthquake seismicity and fault plane solutions in Southern Peru. *J. Geophys. Res.*, vol. 87, B7 : 6139-6152.
- HODGSON (J.) and BREMNER (P.), 1953. — Direction of faulting in Ancash, Peru, earthquake of November 1936 from teleseismic evidence. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 43 : 121-125.
- JAMES (D.E.), 1971. — Plata tectonic model for the evolution of the central Andes. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 82 : 3325-3346.
- KLEIN (F.W.), 1978. — Hypocenter location program HYPOINVERSE. U.S. Geological Survey, Open File Report : 78-694.
- MÉGARD (F.) and PHILIP (H.), 1976. — Plio-quaternary tectono-magmatic zonation and plate tectonics in the central Andes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 33 : 231-238.
- OCOLA (L.) and MEYER (R.P.), 1972. — Crustal low-velocity zones under the Peru-Bolivia Altiplano. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 30 : 199-209.
- PAVLIS (G.L.) and BOOKER (J.R.), 1980. — The mixed discrete-continuous inverse problem : application to the simultaneous determination of earthquake hypocenters and velocity structure. *J. Geophys. Res.*, vol. 85, B9 : 4801-4810.
- ROECKER (S.W.), 1982. — Velocity structure of the Pamir-Hindu Kush region : possible evidence of subducted crust. *J. Geophys. Res.*, vol. 87, B2 : 945-959.
- SANDERS (C.O.) and KANAMORI (H.), 1984. — A seismotectonic analysis of the Anza seismic gap, San Jacinto fault zone, Southern California. *J. Geophys. Res.*, vol. 89, B7 : 5873-5890.
- SCHWARTZ (D.P.), 1983. — Evaluation of seismic geology along the Cordillera Blanca fault zone, Peru. Rapport pour HIDROSERVICE de Woodward-Clyde Consultants, Lima.
- SÉBRIER (M.), MERCIER (J.L.), MÉGARD (F.), LAUBACHER (G.) and CAREY-GAILHARDIS (E.), 1985. — Quaternary normal and reverse faulting and the state of stress in the Central Andes of South Peru. *Tectonics*, 4 : 739-780.
- SÉBRIER (M.), MERCIER (J.L.), MACHARÉ (J.), BONNOT (D.), CABRERA (J.) and BLANC (J.L.), 1987. — The state of stress in an overriding plate situated above a flat slab : the Andes of Central Peru. Soumis à *Tectonics*.
- SILGADO (E.), 1951. — The Ancash, Peru earthquake of November 10, 1946. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 41 : 83-100.
- SILGADO (E.), 1978. — Historia de los sismos mas notables ocurridos en el Peru (1513-1974). Bol. 3, Ser. C. *Inst. geol. min.*, Lima.
- SUAREZ (G.), MOLNAR (P.) and BURCHFIEL (B.C.), 1983. — Seismicity, fault plane solutions, depth of faulting and active tectonics of the Andes of Peru, Ecuador and Southern Colombia. *J. Geophys. Res.*, vol. 88, B12 : 10403-10428.
- UDIAS (A.), BUFORN (E.), BRILLINGER (D.) and BOLT (B.), 1982. — Joint statistical determination of fault-plane parameters. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 30 : 178-184.
- WILSON (J.), REYES (L.) and GARRAYAR (J.), 1967. — Geologia de los cuadrangulos de Mollebamba, Tayabamba, Huaylas, Pomabamba, Carhuaz y Huari. *Bol. Ser. Geol. Min.*, 16.
- YONEKURA (N.), MATSUDA (T.), NOGAMI (M.) and KAISUKA (S.), 1979. — An active fault along the western foot of the Cordillera Blanca, Peru. *Chigaku Zasshi*, vol. 88 : 1-19.