

CAMPAGNE SEAPERC :
ETUDE DE LA DEFORMATION LE LONG D'UNE MARGE CONVERGENTE
DE TYPE ANDIN

J. Bourgois*, G. Pautot+, M. Sosson° et P. Huchon#.

(*) CNRS INSU. Département de Géotectonique. Université Pierre et Marie Curie. T. 26-00. E1. 4 Place Jussieu. 75252 Paris cedex 05. France.

(+) IFREMER. Centre de BREST. B.P. 337. 29273 Brest cedex. France.

(°) CNRS INSU. Institut de Géodynamique. Bat 3. Ave A. Einstein. 06565 Valbonne cedex.

(#) CNRS INSU. Ecole Normale Supérieure. 24 rue Lhomond. 75252 Paris cedex 05. France.

I LES OPERATIONS

La campagne Seaperc (Sea= Seabeam. Perc= Peru-Chile Trench) s'est déroulée du 30 Juin au 28 Juillet 1986. Le port d'embarquement, Manzanillo (Mexique) a été quitté à 15 heures, le port d'arrivée Callao (Pérou) a été atteint 29 jours plus tard à la même heure.

Le premier site (boîte TALARA) localisé au Nord du Pérou (Fig. 1) a été rejoint après un transit de 7 jours et 20 heures. Nous avons quitté le dernier site (boîte MENDANA) 20 heures avant l'accostage. L'ensemble des 7 sites étudiés, localisés de part et d'autre de la fosse du Pérou sont situés entre 4° et 11° de latitude Sud.

L'équipe scientifique était composée de la manière suivante : Jacques Bourgois et Guy Pautot (co-chefs de mission), William Bandy (Texas A&M University), Thierry Boinet (Etudiant à l'Université de Paris VI), Pierre Chotin (Université de Paris VI), Philippe Huchon (CNRS-INSU et ENS Ulm), Bernard Mercier de Lepinay, Marc Sosson (CNRS-INSU et Université de Paris VI), Felix Monge (Instituto Geofisico del Peru), Jacques Monlaü (Etudiant à l'Université de Paris VI), Bernard Pelletier (ORSTOM, Nouméa), et Roland von Huene (US Geological Survey, Menlo Park).

Il y avait à bord un observateur de la marine nationale péruvienne : le Lieutenant Guillermo Hasembank.

L'équipe était renforcée de trois ingénieurs Seabeam : André Gourmelon, Pascal Oge, Serge Louzaouen, d'un spécialiste du flux de chaleur : Claude Toularastel et de deux spécialistes de sismiques monotraces : Loïc Petit de la Villeon et Jean Roudant appartenant tous à l'IFREMER, Centre de Brest.

David Nichols de l'US Geological Survey (Massachusetts) a assuré la mise en oeuvre du système d'acquisition de la sismique multitrace mise à notre disposition par l'US Geological survey.

II OBJECTIFS ET METHODES.

Il est difficile de définir la structure du front de la plupart des marges convergentes, il en résulte des interprétations qui dépendent de modélisations. Concernant le mur interne de la fosse du Pérou, notre objectif était d'obtenir une image 3D de la marge en acquérant des données bathymétriques (Seabeam) et de sismique multitraces dans des régions où la structure de la marge andine était mieux définie grâce à deux profils sismiques perpendiculaires à la fosse. Il s'agit du profil CDP 3 au large de Paita et du profil CDP 2 au large de Chimbote.

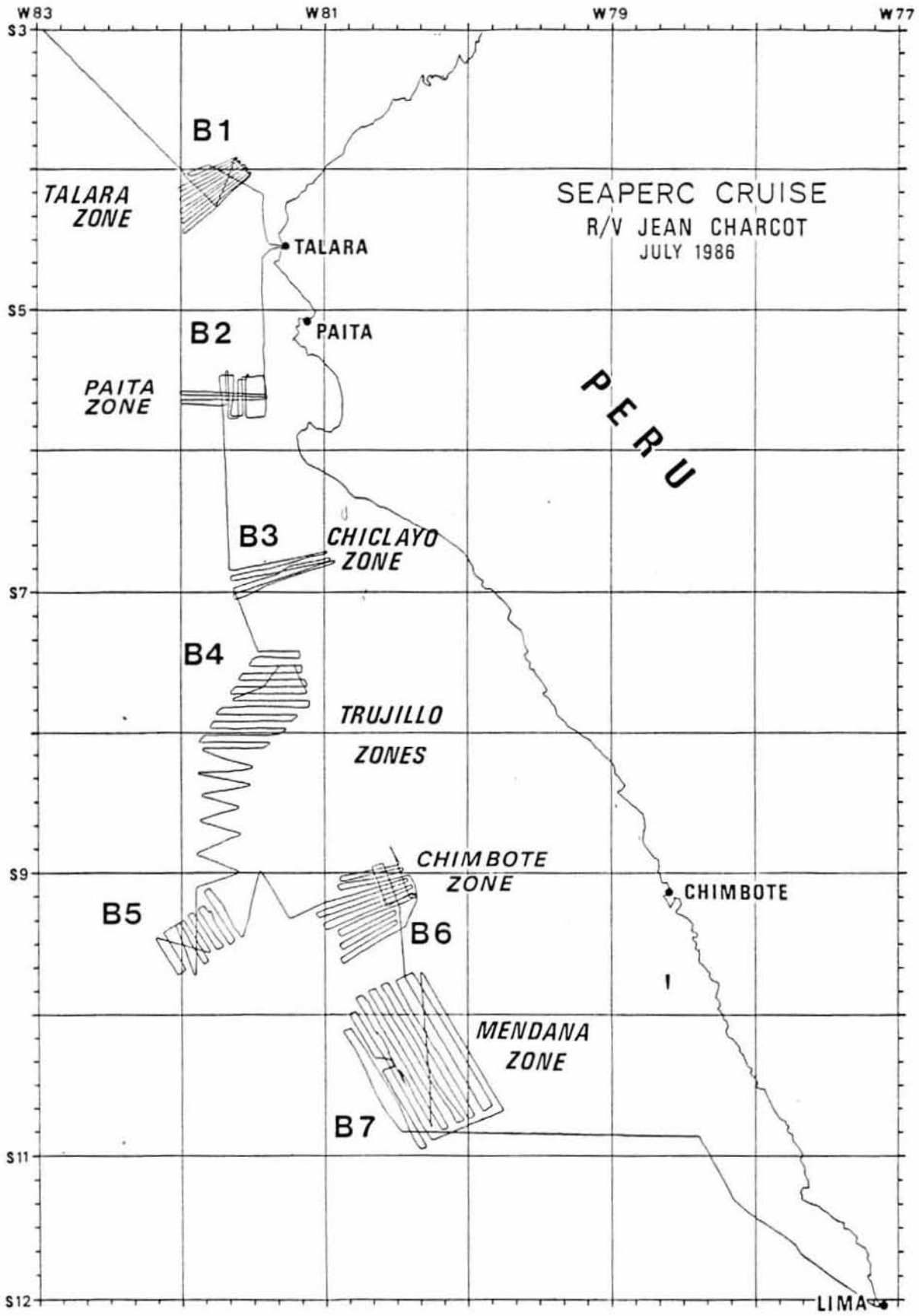


Fig. 1. Route du N/V Jean Charcot durant la Campagne Seaperc (Juillet 86).

Fig. 1. Track lines of the R/V Jean Charcot during the Seaperc cruise (July 86)

respectivement localisées sur les boîtes 2 et 6 de la figure 1.

Les lignes de sismique multitrace acquises pendant la campagne Seaperc sont perpendiculaires aux lignes CDP 3 et CDP 2. La boîte n° 3 localisée sur le Canyon de Chiclayo a été levée dans la perspective de plongées avec le submersible Nautille. cette profonde entaille morphologique perpendiculaire à la marge offre en effet une magnifique coupe naturelle.

Trois structures intra-plaque plongeante proches de la fosse de subduction ont mobilisé notre attention. Il s'agit de la fosse de Trujillo (boîtes 4 et 5) considérée comme l'expression superficielle d'une subduction naissante, de la zone de fracture de Mendana (boîte 7) le long de laquelle la plaque Nazca se déchire perpendiculairement à la fosse et des rides dite de Kulm (boîte 6) offrant une coupe naturelle de la plaque plongeante dans la perspective de plongées avec le submersible Nautille. Le thème majeur abordé avec ces objectifs concerne donc la fragmentation et la stabilité des frontières de plaque.

La figure 1 montre la route du bateau le long de laquelle les leviers bathymétrique (Seabeam) et géophysiques (sismique réflexion monotracer, gravimétrie, magnétisme et mud-penetration 3.5 kHz) ont été conduits pendant la campagne. La boîte Paita n° 2 et la boîte Chimbote n° 6 (fig. 1) ont fait l'objet de leviers de sismique multitrace. La flûte longue de 1200 m comportait un câble 24 traces échantillonnant tous les 4ms le signal d'un canon à air de 540 cm³. Le signal était réceptionné par un enregistreur digital DFS.V. La vitesse du bateau était de 4 noeuds, vitesse requise pour que la source sonore soit à 10 m de profondeur. La capacité du compresseur n'a autorisé que l'acquisition de 12 traces avec un tir tous les 50 m. Les données furent traitées peu de temps après la campagne grâce au

Disco system de l'USGS à Denver (Colorado).

On doit enfin mentionner que la campagne a des relations très fortes avec le programme ODP : le Leg 112 (Novembre-Décembre 1987) et un nouveau projet de forage pour lequel 2 legs sont envisagés. Par ailleurs la campagne de plongée NAUTIPERC du submersible NAUTILE viendra compléter la connaissance de cette marge convergente de type Andin.

III LES RESULTATS.

1. Régime tectonique de la marge andine convergente du Pérou.

On considère classiquement que la subduction liée à la convergence des plaques est à l'origine d'un régime tectonique en compression sur la marge (prisme d'accétion). Depuis le leg 84 du programme IPOD au large du Guatemala [1,2] ce concept ne peut plus être considéré comme unique. La marge du Guatemala est caractérisée par le fonctionnement de failles normales à pendage océanique, limitant des blocs qui basculent vers le continent. Ainsi ce type de marge active se caractérise par un effondrement, résultat d'un appel au vide lié au plongement de la plaque inférieure. Ce deuxième type de marge active fut appelé par Aubouin et coll [3] : "Convergent Extensional Margin". La marge du Pérou, où fut reconnue l'existence de failles normales [4,5] fut proposée comme appartenant à la famille des marges actives en extension [3].

Les résultats de la campagne Seaperc contredisent certaines conclusions des précédents travaux et apportent des précisions sur le régime tectonique de cette marge. Les données géophysiques obtenues, en particulier les données Seabeam, ajoutent aux profils sismiques multitraces la troisième dimension nécessaire à une interprétation rigoureuse. Ainsi la marge convergente du Pérou présente trois

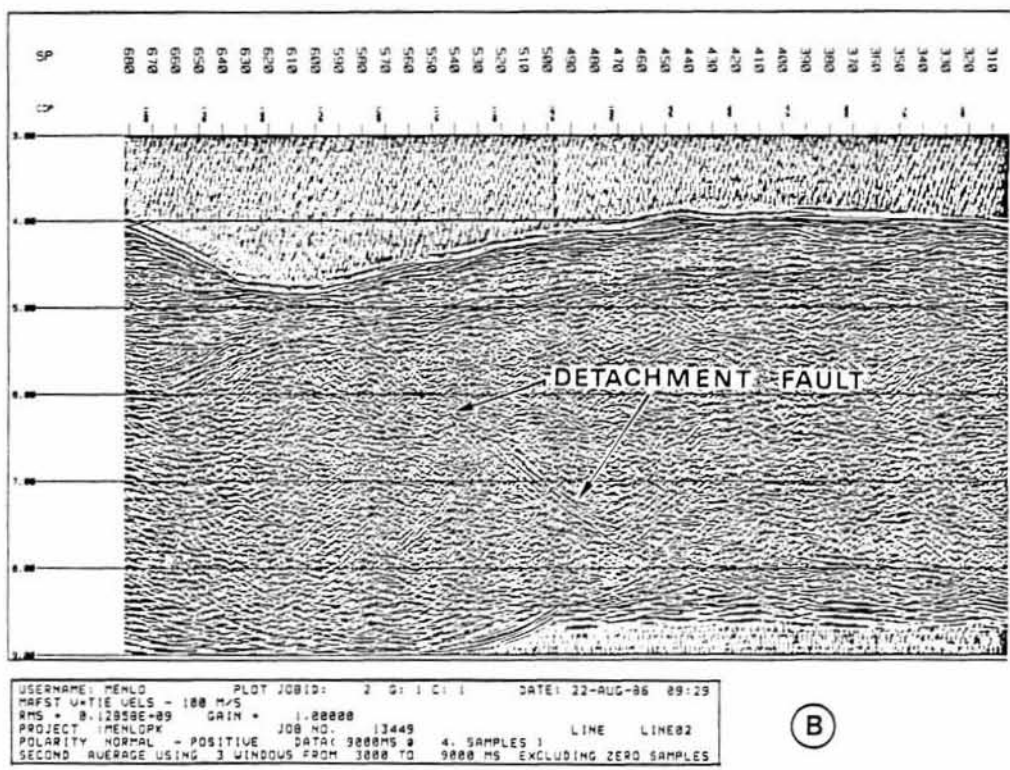
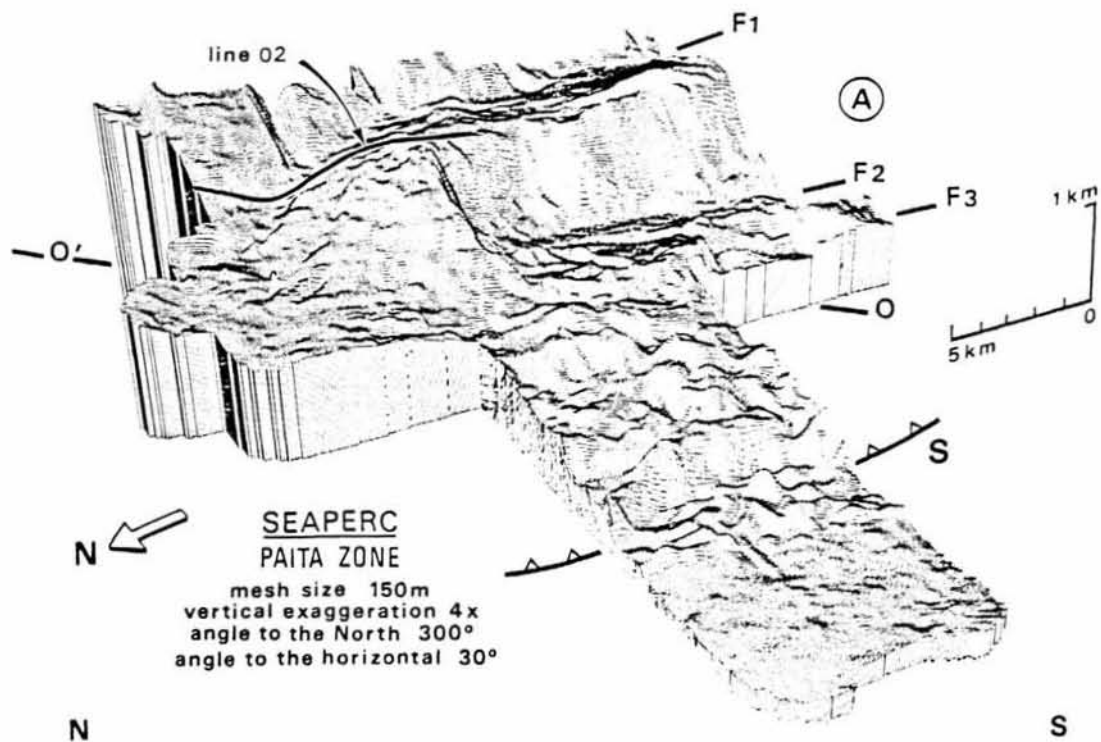


Fig. 2. A: Bloc diagramme bathymétrique de la boîte Paita avec la localisation de la ligne sismique 02 de la Fig. 2B. F1, F2 et F3 : Failles normales curvilignes de la pente médiane. OO': Limite pente médiane-bas de pente S : contact de subduction.

B: Portion nord de la ligne sismique 02 de la campagne Seaperc. Echelle verticale en seconde temps double.

Fig. 2. A: Mesh net perspective diagram of bathymetry including location of seismic line 02 of Fig. 2B. F1, F2 et F3 :curvilinear normal fault of the middle slope area, OO': middle slope-lower slope boundary, S : subduction contact.

B: The northern portion of seismic record 02 of the Seaperc cruise. Verticale scale is 2-way travel time in seconds.

domaines morphostructuraux bien individualisés. du plateau continental vers la fosse : le haut de pente, la pente médiane et le bas de pente (fig. 2). Les deux premières sont caractérisées par un régime tectonique en extension. Le bas de pente résulte de l'accumulation de masses glissées dont on ne peut pas affirmer qu'elles soient écaillées dans la région de Paita. Une absence totale de prisme d'accrétion dans cette région est possible. Il pourrait donc s'agir d'une marge active extensive, au sens strict, comme en Amérique centrale au large du Guatemala. Plus au sud, la zone de Chimbote présente un prisme d'accrétion restreint. L'accrétion ne fonctionne donc pas de manière homogène le long de la fosse du Pérou, phénomène déjà souligné par ailleurs [6]. La pente médiane est découpée en blocs basculés dont la largeur est de l'ordre de grandeur de l'épaisseur de la plaque supérieure au-dessus du plan de subduction (5 à 7 km). Cela suggère que les failles normales qui limitent les blocs basculés sont d'échelle crustale et découpent la plaque supérieure jusqu'au plan de subduction. Ce dispositif implique un découplage important du mouvement le long du plan de subduction, phénomène dans lequel les fluides doivent jouer un rôle fondamentale [7]. L'escarpement qui marque la frontière entre la pente médiane et le haut de pente serait donc directement lié à l'épaisseur de la plaque supérieure.

2. Fragmentation de la plaque Nazca à l'Ouest de la fosse du Pérou.

Les structures intra-plaques océaniques relativement proches des fosses de subduction ont une importance majeure pour l'étude de la fragmentation des plaques et de la stabilité de leurs frontières. Cette campagne a été consacrée également à l'étude de telles

structures de la plaque Nazca entre 8 et 11° de latitude Sud, à l'Ouest de la fosse du Pérou sur la zone de fracture de Mendana et sur la dépression de Trujillo.

Constituée de rides et de bassins orientés N70E la zone de fracture de Mendana (ZFM) arrive perpendiculairement à la fosse du Pérou entre 9°40'S et 10°35' S. L'âge de la croûte océanique est plus ancien de 10 Ma au Sud de la ZFM qu'au nord [8]. Des études récentes [9,10] ont montré : (1) la forme en ciseau (angle de 10°) de la ZFM d'autant plus large qu'on est proche de la fosse; (2) la présence d'anomalie magnétiques récentes (1.2 et 2a) typiquement océaniques et parallèles à l'axe de la ZFM; (3) une différence de 10° dans l'orientation des linéations magnétiques de la croûte océanique ancienne de part et d'autre de la ZFM (N30W au Nord, N20W au Sud). Ces études concluent à l'ouverture océanique active de la portion orientale de la ZFM, induite par la subduction [9,11]. Les résultats de la campagne Seaperc confirment l'hypothèse d'une ouverture intra-océanique le long de la ZFM qui se propage vers l'Ouest dans la plaque Nazca, au fur et à mesure que celle-ci passe en subduction. Ce mécanisme provoque des tensions parallèles à la frontière de plaque, qui induisent de la sorte une déchirure de la plaque plongeante suggérée par une modélisation par éléments finis [11]. La zone d'accrétion océanique présente cependant des caractères tout à fait inhabituels : un flux de chaleur anormalement bas, un faible bombement et un fossé axial ayant une profondeur identique à celle de la plaque avoisinante (5500 m).

La dépression de Trujillo a été interprétée soit comme un fossé d'extension, soit comme l'expression externe d'un chevauchement intra-océanique à vergence Ouest. Elle s'allonge sur 210 km depuis la fosse du Pérou par 7°40' S jusqu'à la terminaison orientale de la fracture

Vera à 9°25' S (fig. 3). Les nouvelles données de cette campagne indiquent que : (1) le compartiment oriental chevauche avec une composante décrochante senestre le compartiment occidental, le long d'un accident majeur situé sur le bord Est de la dépression de Trujillo; (2) le compartiment occidental est soumis à un régime en tension approximativement EW; (3) la fracturation du bloc oriental (décrochement dextres N140E et conjugués senestres N20E) est compatible avec une contrainte en compression proche de N170E. La différence de régime tectonique des compartiments situés de part et d'autre de la dépression conduit à envisager un découplage important à

la frontière des blocs. Cela conduit à penser que la zone de Trujillo représente le stade naissant d'une zone de subduction intra-océanique. Ainsi la dépression de Trujillo est le siège d'un début de subduction active à vergence océanique compatible avec : (1) un mouvement dextre le long de la zone de fracture de Vera; (2) la subduction de la plaque Nazca sous l'Amérique du Sud et (3) avec l'ouverture océanique le long de la zone de fracture de Mendana (fig. 3). Les études menées pendant la campagne SEAPERC conduisent à penser que la subduction est le processus explicatif majeur de la fragmentation de la plaque océanique Nazca au large du Pérou.

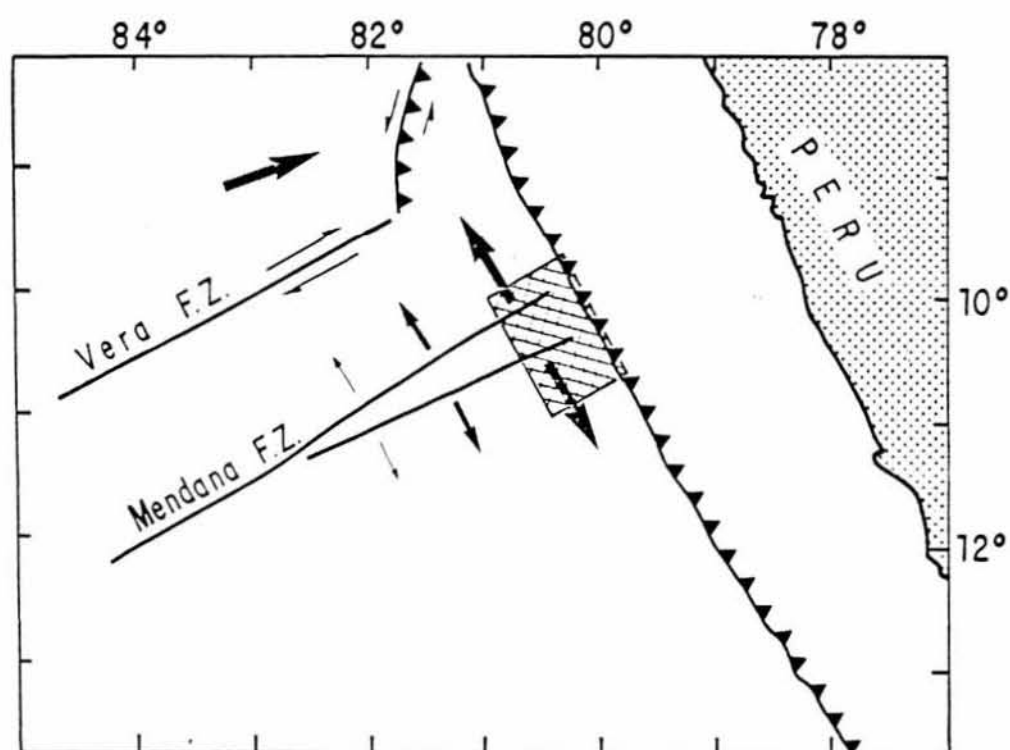


Fig. 3. Cinématique de la région Trujillo-Mendana. La subduction naissante de Trujillo est liée à l'ouverture de la zone d'accrétion océanique de Mendana.

Fig. 3. Kinematics of the Trujillo-Mendana region. The newly formed subduction of the Trujillo zone is related with the spreading activity along the Mendana Fracture Zone.

IV ABRIDGED ENGLISH VERSION

Marine geophysical surveys employing Seabeam, multi- and single-channel seismic reflection, gravity and magnetic instruments were conducted along the Peru Trench (4°S to 10°S) during the Seaperc cruise of the R/V "Jean Charcot" in July 1986.

1. Tectonic regime of the Andean Convergent Margin off Peru.

The structure of the subduction complex of the Andean margin is best defined along two transverse multichannel seismic records [12,13,14], one in an area between latitude 5°S and 6°S offshore Paita (CDP-3), and the other between latitudes 8°30'S and 9°30'S offshore Chimbote (CDP-2). Two Seaperc surveys were centered around these seismic lines. The northern zone is the Paita area (box 2 of the Seaperc cruise) and the southern zone is the Chimbote area (box 6) (fig.1). The objectives of our studies in Paita and Chimbote areas are (1) to map the main scarps and canyons in the

mid-slope area where the contact between continental crust and accretionary materials can be observed on the seafloor and sampled, and (2) to make additional CDP seismic records across CDP-3 and CDP-2 at points where sites had been proposed for ODP Leg 112. A third and overall objective is to acquire a three-dimensional knowledge of the structure in order to image the tectonic regime of the Peruvian margin and clarify the transition zone between the edge of the South American continental crust and the subduction complex adjacent to the trench.

The main observations we have made on the basis of Seabeam and seismic data can be summarized as follows : (1) The continental slope off Peru consists of three distinct morpho-structural domains instead of just two as previously reported. From east to west are the upper slope, the middle slope and the lower slope (2) the middle slope, especially in the Paita area displays the morphologic characters of collapse features.

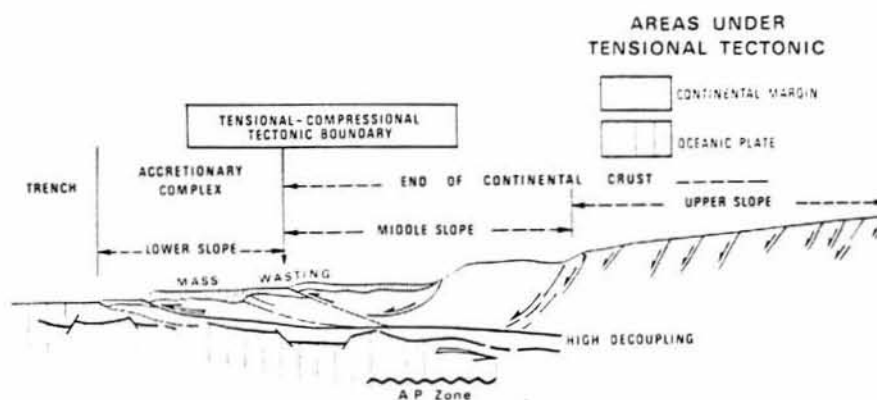


Fig. 4. Diagramme schématique illustrant la marge convergente en extension ou "collapsing convergent margin" au large du Pérou (Zone Paita).

Fig. 4; Diagrammatic sketch illustrating the "convergent-extensional margin" or "collapsing convergent margin" model as exemplified by the Andean Margin off Peru (Paita area).

In the Païta area, three major faults define two landward tilted blocks. (3) The youthfulness of the collapse features of Païta area is seen in the shallow burial of slump debris in the trench axis, the little modified slump debris of the lower slope, the freshness of the fault scarps in the middle slope area and the youthfulness of the evolution of the upper slope distributary system. The main tectonic feature evidenced in the Païta area are shown schematically in Fig. 4. The seaward thinning of the Andean continental crust beneath the Peru margin is associated to detachment faulting which occurs in the middle slope area where the continental crust is at a critical thickness. Massive collapse of the middle slope appears to be a young and rapid process considering the fresh relief of fault scarps and canyon morphology in upper and middle slope areas. Of particular importance to the understanding of the margin is the location of the tensional-compressional tectonic boundary. It occurs at the middle slope-lower slope boundary in the Païta area. Its position is less clear in the Chimbote zone; however, the boundary is seaward of the middle slope terrace, perhaps at the first down-slope bench. The continental basement of the South American continent is involved in the collapse structure of the middle slope area. The Peruvian margin exhibits a young accretionary complex stacked against the front of continental crust. This model is similar to that based on the result of Leg 84 off Guatemala across the landward slope of the Middle America Trench where no accretion or little accretion was found [3,4]. The Peru margin may be considered as a "convergent-extensional margin".

2. Fragmentation of the Nazca Plate west of the Peru Trench.

The Mendana Fracture Zone (MFZ) and the Trujillo Trough (TT) are two major intra-oceanic features on the Nazca Plate off Peru. The MFZ was interpreted as a propagating rift which was proposed to form in response to subduction induced extensional stresses in the Nazca Plate [7]. Further support for this hypothesis is provided by finite element stress models of the Nazca Plate [16,11] which indicated that the Nazca Plate in the vicinity of the MFZ exhibits an extensional stress oriented parallel to the trench axis. Another feature on the Nazca Plate off Peru is the Trujillo Trough, which joins the Peru Trench to the Vera Fracture zone. Warsi et al [9] place a westward thrusting ("tectonic front") along the eastern edge of the TT. The Seaperc data shown the relationship between MFZ and TT. The TT is thus a strike-slip fault in a compressional context, whose sense is well documented: first, the widening of the N-S graben of the western block as it arrives in the TT; second, the left-lateral displacement of topographic elements along the fault, and, above all, the fact that this movement brings out, in the southernmost part of the TT (South Trujillo Seaperc box), a maximal compressional stress leading to north-verging overthrusts. A right-lateral strike slip movement is associated along N130E to N150E striking fault. Thus the possible mechanism of the deformation in this area is an approximately N-S trending direction of compressional stress (fig. 3).

The MFZ near its intersection with the Peru Trench clearly appears, both from a structural an from a magnetic point of view, to be formed by two domains: the old fracture zone responsible for the offset of the magnetic anomalies of Nazca Plate, and a new rift which produces magnetic anomalies perpendicular to

the old ones. The newly accreted zone was produced asymmetrically between at least anomaly 2A and present with a possible jump of the spreading center at anomaly 2 time and presents some atypical characteristics for a rift system (1) It quickly disappears eastward in the subduction zone. (2) It displays very low heat flow values (3) although the rift zone itself is triangular, the magnetic lineations are not fan shaped, but the oldest anomalies are the shortest. This geometry is typical of a propagating rift. However, no transform zone connects the Mendana rift to a failing rift, and no lithospheric transferral occurs. Thus, it does not conform the propagating rift model [17]. Since the geometrical approach of Hey et al. [17] does not apply, the Mendana Rift thus appears as a new class of propagating rift. It requires some compressive deformation to occur within the Nazca Plate as the N-S trending compressional stress deduced from the TT Seaperc surveys.

Bibliographie

- [1] J. Aubouin et l'équipe du Leg 84. Nature, 297, 1982, p.458-460.
- [2] R. von Huene et l'équipe du Leg 84. Init. Repts. DSDP.84, 1985, 967p.
- [3] J. Aubouin, J. Bourgois et J. Azema. Earth Planet. Sc. Lett., 67, 1984, p.211-218.
- [4] J.P. Soulas. Rev. Geogr. Phys. Geol. Dyn., Fasc. 5, 1978, p. 399-414.
- [5] T. Thornburg. in D.M. Hussong et L.D. Kulm ed. Ocean Margin Drilling Program. Reg. Atlas Ser., Atlas 6. Woods Hole (sous presse).
- [6] R. von Huene. Geologische Rundschau, 75-1, 1986, p.1-15.
- [7] R. von Huene et H. Lee. in Watkins et Drake ed. Mem. Amer. Assoc. Pet. Geol., 34, 1984, p.781.
- [8] D.W. Handschumacher. Geophys. Monogr. 19, 1976, p. 177-202.
- [9] W.E.K. Warsi, T.W.C. Hilde et R.C. Searle. Tectonophysics, 99, 1983, p.313-329.

- [10] T.W.C. Hilde, R.C. Searle et W.E.K. Warsi. EOS, 59, 1980, p.1182.
- [11] M.J.R. Wortel et S.A.P.L. Cloetingh. Tectonophysics, 112, 1985, p.443-462.
- [12] G.L. Shepherd et R. Moberly. Geol. Soc. Amer. Mem., 154, 1981, p.351-392.
- [13] J. Miller et R. von Huene. U.S. Geol. Sur. Geophys. Invest. Map, 1987.
- [14] R. von Huene, L. D. Kulm et J. Miller. J.G.R., 90 (B7), 1985, p.5429-5442.
- [15] T.W.C. Hilde, R.C. Searle et W.E.K. Warsi. EOS, 61, 1980, p.1122.
- [16] R.M. Richardson et B.L. Cox. J.G.R., 89, B12, 1984, p. 10043-10052.
- [17] R.N. Hey, M.C. Kleinrock, S.P. Miller, T. M. Atwater et R.C. Searle. J.G.R., 91, B3, 1986, p.3369-3393.

V. PUBLICATIONS.

Bourgois J., Pautot G., Bandy W., Boinet T., Chotin P., Huchon P., Mercier de Lepinay B., Monge F., Monlaü J., Pelletier B., Sosson M. et von Huene R. 1986. - Structure of the inner Trench wall : 4°-11°S. E.O.S., vol.67, n°44, p.1196.

Bourgois J., Pautot G. et l'équipe scientifique de la mission Seaperc du N O Jean Charcot. On board Report (Juillet, 1986).

Pautot G., Bourgois J. et l'équipe scientifique de la mission Seaperc, 1986. - Intra Nazca Plate subduction as exemplified by the Trujillo trough off Peru. E.O.S., vol. 67, n°44, p.

Bourgois J. - La vérité sur les chaînes de Montagne se cherche parfois au fond des mers. CNRS-INFO, n°129, p.3.

Bourgois J., Pautot G. et l'équipe scientifique de la mission Seaperc, 1986. - Régime tectonique de la marge andine convergente du Pérou (campagne Seaperc du N O Jean Charcot, Juillet 1986). C.R. Acad. Sc., Paris, t.303, p.1599-1604.

Bourgeois J., Pautot G. et l'équipe scientifique de la mission Seaperc. 1986.- Déformation et subduction : Exemple de la fosse du Pérou. Colloque de Villefranche.

Bourgeois J., Pautot G. et l'équipe scientifique de la mission Seaperc. 1986.- Fragmentation de la plaque Nazca à l'Ouest de la fosse du Pérou : résultats de la campagne Seaperc du N O Jean Charcot. Juillet 1986. C.R.Acad.Sc., Paris. t.303. p.1651-1656.

Bourgeois J., Pautot G. et l'équipe scientifique de la mission Seaperc. 1988.- Seabeam and seismic reflexion imaging of the tectonic regime of the Andean continental margin off Peru (4°S to 10°S). Earth and Planetary Science Letters. (87), p.111-126.

von Huene R., Bourgeois J., Miller J. et Pautot G. 1989.- A large Tsunamogenic landslide and debris along the Peru Trench. J.G.R., sous presse.

Bourgeois J., Pautot G. et l'équipe Seaperc. 1987. Campagne Seaperc au large du Pérou. Géochronique, n°21, p.23.

Bourgeois J. 1987.- Enigmes géologiques au large du Pérou. La Recherche, n°186.

Bourgeois J., Pautot G. et l'équipe scientifique de la mission Seaperc. 1987.- The tectonic regime of the Andean Continental Margin off Peru. E.O.S., vol.68, n°44, p.1498.

Bourgeois J. 1987.- Seaperc : Dossier de Presse de la Mission Seaperc du N O Jean Charcot (Juillet 1986).

Bourgeois J., von Huene R., Pautot G. and Huchon P. 1988.- Seabeam Survey by the R V Jean Charcot (July 1986) along the ODP Leg 112 northern transect (Sites 683 and 685 off Chimbote). Prog. ODP, Init. Repts. 112, College Station, TX (Ocean Drilling Program), p.131-137.

Bourgeois J. 1987-1988.- Dossier de Presse de la Campagne Nautiperc au Pérou.

Bourgeois J. 1989.- Tectonic History of the Peruvian Margin with special references to tectonic erosion. Invited paper to 28th International Geological Congress, Washington D.C., Accepté.

Huchon P. and Bourgeois J., 198.- Subduction induced fragmentation of the Nazca Plate off Peru : Mendana Fracture Zone and Trujillo Trough revisited. J.G.R., Soumis.