

Géodynamique

M. Xavier LE PICHON, membre de l'Institut
(Académie des Sciences), professeur

COURS : LA CINÉMATIQUE DES PLAQUES SANS SYSTÈME DE RÉFÉRENCE EXTÉRIEUR

Le cours de l'année 1987-1988 a été consacré à la cinématique des plaques sans système de référence extérieur. Le but poursuivi n'était pas de fournir un exposé exhaustif mais plutôt de caractériser l'évolution de la recherche actuelle en ce domaine. On discutait en particulier la validité des deux hypothèses fondamentales du modèle de cinématique décrivant les mouvements des plaques durant les trois derniers millions d'années, à savoir l'indéformabilité de la partie interne des plaques et le fait que leurs accélérations durant cette période soient négligeables. Durant les quatre dernières années, l'introduction des méthodes de la géodésie spatiale a profondément transformé la discipline puisqu'elles permettent de mesurer des distances de plusieurs milliers de kilomètres avec une précision de l'ordre du centimètre. Désormais, la cinématique « instantanée », établie à partir des mesures répétitives faites sur quelques années, et en toutes parties du continent, pour laquelle les hypothèses d'indéformabilité interne et d'accélération nulle peuvent être relaxées, est directement comparée à la cinématique des trois derniers millions d'années. Les premiers résultats obtenus ont déjà contribué à établir que les deux hypothèses de base permettent une description remarquablement précise des mouvements récents, la prévision allant bien au-delà de ce qui était envisagé initialement.

L'importance de cette transformation est considérable. Avant l'introduction des méthodes de géodésie spatiale, la cinématique des plaques était une cinématique des portions océaniques des frontières de plaques. En effet, toutes les mesures de déplacement utilisées pour le calcul étaient faites sur ces frontières en domaine océanique. Avec la géodésie spatiale, la situation s'inverse. Les mesures ne sont effectuées qu'en domaine continental et ne sont pas généralement situées sur les frontières. Le premier type de cinématique pouvait ignorer les effets dus à la déformation élastique des bords de plaques

puisque'on évaluait les déplacements sur quelques millions d'années. Le second doit en tenir compte puisque les déplacements sont évalués sur quelques années.

Le cours a par ailleurs abordé les problèmes très difficiles posés par la description cinématique de la déformation intracontinentale à partir du cas du continent asiatique.

Il a enfin discuté la rénovation nécessaire des méthodes de détermination de la cinématique finie.

Les notes de cours ont été distribuées aux participants.

1. *Le modèle*

On considère la Terre comme une sphère de rayon constant, couverte de coquilles minces, indéformables dans leur partie interne, appelées plaques. Celles-ci sont en mouvement relatif et l'hypothèse d'indéformabilité est relaxée sur les frontières. Dans un système de référence ayant son origine au centre de la Terre, le mouvement infinitésimal d'une plaque est une rotation décrite par un vecteur axial :

$$\vec{\Omega} = \omega \cdot \vec{K}$$

et le mouvement relatif entre deux plaques i et j , celui qui nous intéresse pour décrire la déformation qui en résulte, est la rotation de vecteur axial :

$${}_i\vec{\omega}_j = \vec{\Omega}_i - \vec{\Omega}_j$$

La vitesse d'un point \vec{r} appartenant à la plaque (i) par rapport à la plaque (j) est :

$$\vec{v}_{ij}(\vec{r}) = {}_i\vec{\omega}_j \times \vec{r}$$

Les données dont on dispose pour déterminer ${}_i\vec{\omega}_j$ dans le modèle océanique habituel sont disposées sur la frontière (ij) et sont, soit le module v_{ji} , soit la direction \vec{v}_{ji}/v_{ji} en un certain nombre de points.

Par ailleurs, la rigidité impose les conditions de fermeture :

$${}_1\vec{\omega}_2 + {}_2\vec{\omega}_3 + \dots + {}_n\vec{\omega}_1 = 0$$

Il en résulte qu'en un point où trois frontières de plaque se rencontrent, appelé point triple, on a :

$$\vec{v}_{12} + \vec{v}_{23} + \vec{v}_{23} = 0$$

Le taux de surface de plaque absorbée ou créée entre deux points \vec{r}_1 et \vec{r}_2 d'une frontière de plaque (ij) est :

$$\dot{S} = {}_i\vec{\omega}_j \cdot (\vec{r}_2 - \vec{r}_1)$$

La sommation de \dot{S} sur toutes les frontières de plaque doit donner un résultat nul si les hypothèses initiales sont vérifiées.

2. Validité du modèle global actuel

C'est un modèle à onze ou douze plaques n'utilisant que des données provenant des portions océaniques de frontières de plaques. Ces données sont les taux d'expansion aux dorsales moyennés sur 1,9 à 4,8 millions d'années, les directions des zones transformantes Rift à Rift et les projections horizontales des vecteurs glissements des séismes, en tout quelques centaines de mesures pour trente à trente-trois paramètres indépendants à déterminer. Le modèle ne révèle pas de problème de fermeture, sauf dans le cas particulier de l'océan Indien. La qualité de l'ajustement des données montre que le taux de déformation interne aux plaques ne peut dépasser en moyenne $5 \times 10^{-18} \text{s}^{-1}$. Il semble qu'on puisse au mieux diminuer les incertitudes sur les mesures par un facteur d'environ trois. Mais les informations que nous avons sur la sismicité intraplaques suggère que le taux de déformation interne aux plaques est probablement au moins un ordre de grandeur plus petit et qu'il ne pourra pas être mesuré par la cinématique océanique traditionnelle.

La qualité de l'ajustement du modèle suppose évidemment que la valeur de l'accélération :

$$d_i \vec{\omega}_j / dt$$

soit très faible pour que ses effets ne soient pas décelables sur trois millions d'années. Pourtant, il est clair que la nature même de la cinématique finie impose l'existence de telles accélérations. En effet, plusieurs rotations ne peuvent procéder à taux constant simultanément sans ajustement durant un temps fini dans un système où les vecteurs rotations sont liés aux plaques. Par ailleurs, des ajustements catastrophiques sont inévitables, lorsque par exemple un Rift en expansion est subduit dans une fosse.

Ce problème n'a encore été que très peu discuté. Toutefois, l'examen de la cinématique finie des océans révèle que, si ces ajustements existent bien, ils se produisent typiquement dans des intervalles de temps courts séparés par des périodes longues. Ces intervalles de temps sont probablement de l'ordre du million d'années ou moins, mais la résolution actuelle ne permet pas de déterminer leur durée exacte.

La meilleure façon de tester le modèle cinématique global est encore d'examiner les prédictions en domaine continental. A cet égard, il existe deux zones clefs : la Nouvelle Zélande et la Californie. Dans les deux cas, une frontière de plaque océanique passe en domaine continental pour retourner en domaine océanique. Le mouvement prédit peut donc être testé sans ambiguïté par les observations géologiques et les mesures géodésiques. Le cas de la Nouvelle Zélande est particulièrement simple et éclairant. L'accord avec la

valeur prédite est bon si l'on intègre la déformation sur une zone de 80 à 100 kilomètres de large qui correspond à la frontière de plaque. Les mesures géodésiques ayant été effectuées durant 50 à 100 ans alors que le modèle donne la valeur moyenne sur trois millions d'années, il est clair que l'accélération a effectivement été négligeable. Si la distribution de la déformation est plus compliquée en Californie, on constate également l'absence d'accélération significative.

Ce résultat surprenant a été conforté de manière spectaculaire par les mesures de géodésie spatiale à très longue portée. Ainsi, par exemple, les mesures sur deux ans montrent un mouvement de certains points de la plaque Pacifique par rapport au Japon d'environ $8 \text{ cm} \pm 1 \text{ cm an}^{-1}$ en accord avec les valeurs prédites par le modèle global. Or le mouvement Pacifique/Eurasie est obtenu par fermeture du modèle global et en supposant l'absence d'accélération sur trois millions d'années !

3. Epaisseur des frontières de plaque en domaine océanique

La largeur d'une frontière de plaque semble être typiquement de l'ordre de la centaine de kilomètres en domaine continental. Elle est nettement moindre en domaine océanique. Trois types de structures peuvent fournir des indications précises à ce sujet bien qu'à notre connaissance ceci ne semble pas avoir été réalisé par les auteurs. Il s'agit dans les trois cas de structures affectant les frontières en expansion ou Rifts, à savoir les points triples, les propagateurs et les relais de Rifts. En ce qui concerne les points triples, on a discuté les cas du point triple de Rodrigues dans l'océan Indien et du point triple des Galapagos dans le Pacifique. La discussion classique suppose que la largeur des frontières de plaque est infinitésimale, ce qui est évidemment faux. On montre qu'il est facile de se servir de la trace laissée par le point triple sur chacune des plaques pour déterminer la largeur de la zone de déformation, en se donnant a priori un modèle de distribution de la déformation. Dans le modèle le plus simple d'une distribution homogène à l'intérieur des zones frontière, on trouve une largeur équivalente à un âge de 0,3 à 0,7 millions d'années.

Un raisonnement du même type peut être tenu en ce qui concerne le modèle du Propagateur des Galapagos et conduit à une largeur équivalant à un âge de 0,2 Ma.

Quant aux relais de Rift, ils se produisent entièrement à l'intérieur de la zone d'âge inférieur à 200 000 ou 300 000 ans, confirmant qu'il s'agit d'une zone de déformation fragile où l'épaisseur de la croûte cassante ne dépasse pas 2 à 3 km pour des raisons thermiques. L'axe d'extrusion volcanique principal, large de 2 à 3 km, est situé à un instant donné au-dessus d'une chambre magmatique de même largeur et de profondeur 2 à 3 km, cylindrique mais discontinue. Les migrations de l'axe sont contrôlées par les migrations

longitudinales et latérales de la chambre magmatique qui n'est pas nécessairement permanente.

4. Modélisation numérique de la Cinématique des Plaques

Il faut maintenant distinguer la cinématique « instantanée » qui concerne les dernières années et est faite à partir des mesures géodésiques et la cinématique finie faite à partir des données océaniques et dans laquelle le mouvement est moyenné sur au moins trois millions d'années. L'approche qui semble la plus intéressante est une approche bayésienne qui décrit l'état de nos informations sur l'ensemble des données par des densités de probabilité dans l'espace des paramètres, en combinant les informations sur l'incertitude dans les données, l'information a priori sur les paramètres du modèle et l'information sur la corrélation physique entre paramètres observés et paramètres du modèle. En fin de compte, ce qu'il faut obtenir, ce sont les incertitudes sur les vitesses elles-mêmes ou sur les positions des points reconstruits.

En ce qui concerne la cinématique finie, il faut ajuster simultanément les isochrones et les directions transformantes données en particulier par les mesures satellitaires altimétriques, en partant de l'actuel et en choisissant des tranches de temps correspondant à la résolution des données.

En ce qui concerne la cinématique instantanée, on peut tenir compte des déformations internes aux plaques en introduisant un champ de vitesse relativement simple. On peut par exemple choisir un champ polaire où :

$$\vec{v}(\vec{r}) = \omega(\vec{r}) \cdot {}_1\hat{\Omega}_2 \times \vec{r}$$

où ${}_1\hat{\Omega}_2$ est le vecteur unitaire définissant la rotation de la plaque 2 par rapport à la plaque 1, et $\omega(\vec{r})$ est un champ scalaire tel que, hors de la zone de déformation, $\omega(\vec{r}) = [{}_1\hat{\Omega}_2]$.

5. Description cinématique de la déformation intracontinentale : cas de l'Asie

La déformation intracontinentale asiatique est dominée par le mouvement de convergence entre l'Inde et l'Asie. Ce mouvement est déterminé de manière satisfaisante par la cinématique globale. Toutefois, il est important de tenir compte de l'effet de la frontière de plaque océanique nord-est indienne qui a commencé à se former au Miocène Supérieur. Le meilleur modèle publié utilisable à l'heure actuelle est celui de Chase à condition de le modifier en incorporant l'Inde à l'Arabie et en la détachant de l'Australie. Il en résulte que le pôle s'est déplacé vers l'Est d'une vingtaine de degrés au Miocène Supérieur. Le mouvement de l'Inde par rapport à l'Eurasie a tourné dans le sens inverse de 30° (à l'Ouest) à 15° (à l'Est) ce qui est important, alors que jusqu'à présent les auteurs n'en ont pas tenu compte.

Connaissant ce mouvement de convergence, Inde-Eurasie, il faut distribuer la déformation entre la convergence himalayenne et la déformation asiatique.

On ne peut pas faire l'économie d'une cinématique sur la sphère à cause des très grandes dimensions de la zone déformée. On peut montrer que le champ de déformation est en première approximation un champ polaire du type décrit plus haut, dont le pôle se trouve près de 11 °N, 95 °E. Ceci se traduit par la dominance des grandes failles de décrochement avec zones d'extension en position de pull-apart vers leurs extrémités orientales. Le mouvement est partout orienté de telle manière qu'il est en gros perpendiculaire aux zones de subduction périphériques, ce qui suggère un rôle joué par la force de succion. Le champ scalaire $\omega(\vec{r})$ est tel que la vitesse d'expulsion de la Chine vers l'Est ne varie pas de manière significative avec la distance au pôle de rotation. Ceci implique que le module ω varie à peu près comme l'inverse du sinus de la distance au pôle de rotation. Cette décroissance de ω se fait de manière discontinue le long de grandes failles de décrochement sénestres.

On peut alors discuter la partition du mouvement Inde/Eurasie entre la convergence himalayenne et l'expulsion chinoise. Des considérations cinématiques montrent qu'il est peu probable que l'expulsion puisse absorber plus de 30 % de la convergence totale.

Cette discussion concerne la cinématique actuelle. On montre qu'il est probable que la partition du mouvement varie au cours du temps et qu'elle dépend de la situation mécanique de la convergence himalayenne. La dernière séquence de variation date du Miocène moyen lorsque le plan de chevauchement himalayen actuel, le « Main Boundary Thrust » a été établi. Plus la longueur du chevauchement augmente, plus l'énergie dissipée dans la convergence himalayenne est grande et plus, en conséquence, la proportion de mouvement absorbé par l'expulsion chinoise doit être grande.

X. L.-P.

SÉMINAIRES (JANVIER - AVRIL 1988)

1. *Cinématique instantanée*

7 janvier : Apport Géodésique, avec M. SOURIAU.

14 janvier : Le Point Triple Rodrigues et les Dorsales associées, avec R. SCHLICH.

22 janvier : Analyse structurale d'un Rift et d'une Faille transformante, avec P. CHOUKROUNE.

29 janvier : Propagation de Rift et « Overlapping Rifts » dans le Pacifique, avec J. FRANCHETEAU.

19 février : Cinématique Inde-Asie actuelle, avec P. MOLNAR.

26 février : Déformations intracontinentales entre l'Inde et l'Asie, avec P. TAPPONNIER.

2. Cinématique finie

4 mars : Cinématique de l'océan Atlantique, avec J.L. OLIVET.

11 mars : Cinématique de l'océan Indien, avec P. PATRIAT.

15 avril : Cinématique Inde-Asie depuis le Crétacé, avec J. BESSE.

ACTIVITÉS SCIENTIFIQUES DE JUIN 1987 A MAI 1988

Xavier LE PICHON dirige le Département de Géologie de l'Ecole Normale Supérieure qui, depuis le 1^{er} janvier 1988, correspond à une seule unité associée au CNRS. Le département regroupe 22 chercheurs et enseignants répartis en trois équipes. Une équipe de Géophysique interne est animée par Claude Froidevaux, une équipe de Géochimie par Martine Lagache et une équipe de Géodynamique par Xavier LE PICHON et Jean-Pierre POZZI. L'équipe de Géodynamique comprend huit chercheurs.

1. Principaux thèmes de recherche et résultats acquis

a) Etude de la subduction

Ce thème a été l'objet d'un effort considérable, principalement au Japon où a été mis en place puis exploité le programme franco-japonais KAIKO mais aussi dans l'Atlantique au large de La Barbade où deux campagnes, l'une avec un engin remorqué près du fond, la campagne ENSBAR, l'autre avec le sous-marin Nautil, la campagne BARESNAUT. X. LE PICHON, P. HUCHON, S. LALLEMANT, L. JOLIVET, N. CHAMOT-ROOKE et P. HENRY ont joué un rôle important dans la coordination et l'exploitation des résultats de ces campagnes.

Les résultats principaux concernent :

— le rôle tectonique des fluides, leur association avec des écosystèmes spécialisés, leur caractérisation physique et chimique et leur lien éventuel avec la sismicité ;

— la subduction d'aspérités significatives comme les volcans sous-marins et les rides sous-marines, subduction qui semble se faire avec une facilité remarquable jusqu'à une taille maximale correspondant à celle d'un arc insulaire ;

— la tectonique gravitaire importante affectant la marge de la fosse japonaise ;

— la compression intra-océanique à l'origine de spectaculaires chevauchements intra-lithosphériques en avant de la fosse (ride de Zenisu), chevauchements qui pourraient être la première étape de la formation des ophiolites.

b) *Contexte géologique de la subduction*

Une caractéristique essentielle de ce programme d'étude de la subduction est qu'il cherche à la replacer dans son contexte tectonique et historique à partir d'études de géologie structurale menées sur les îles adjacentes (travaux de P. HUCHON, L. JOLIVET et S. LALLEMANT) et d'études de reconstitutions géologiques dans un cadre cinématique (travaux de P. HUCHON, L. JOLIVET et X. LE PICHON).

Un résultat important, lié aux travaux de L. JOLIVET, est le rôle majeur joué par les décrochements dextres dans le Japon du Nord, qui a conduit à une interprétation de l'ouverture de la mer du Japon en termes de pull-apart.

c) *Extension et formation des marges passives*

La campagne de sismique à deux bateaux MINOS menée en 1986 dans le Golfe de Suez et le nord de la Mer Rouge a permis d'élaborer un nouveau modèle d'évolution de cette zone où se forme un nouvel océan. Il est proposé, par J.M. GAULIER et X. LE PICHON, que la croûte océanique a commencé à être mise en place il y a 13 Ma, au Miocène moyen, à une époque où la vitesse d'ouverture entre l'Afrique et l'Arabie a augmenté d'un facteur trois. C'est aussi à cette époque qu'on commencé à se former la faille du Levant et la faille nord-Anatolienne ainsi que l'extension égéenne. La géodynamique du Proche Orient depuis 13 Ma a pu ainsi être analysée de manière précise.

d) *Physique de l'aimantation et paléomagnétisme*

Un nouvel appareillage a permis à J.P. POZZI et T. AIFA d'aborder le problème des réaimantations de façon originale. L'analyse thermomagnétique fine a permis de montrer la présence inattendue de magnétite comme porteur de la réaimantation permienne du Dévonien Saharien.

Les séquences d'inversions du champ magnétique terrestre dans les sédiments ont été abordées à la fois par la magnétostratigraphie conventionnelle sur section de terrain et par les diagraphies magnétiques en forage. Le forage du Sancerrois a permis d'expérimenter pour la première fois le magnétomètre de puits haute résolution mis au point avec Total, le CEA et le CNRS. La qualité des données a été montrée par modélisation à partir des mesures sur carottes.

ACTIVITÉS DIVERSES

X. LE PICHON a assuré la présidence de la Seconde Conférence sur le futur du Forage Océanique qui regroupait 340 chercheurs venant de 20 pays

différents à Strasbourg au mois de juillet 1987. Il a par ailleurs animé le groupe de réflexion qui assurait la coordination de la rédaction du rapport correspondant, finalisée lors d'une réunion tenue à l'Ecole Normale à Paris au mois d'octobre 1987.

Il a participé à deux campagnes à la mer, ENSBAR et BARESNAUT, aux mois d'août et septembre 1987.

X. LE PICHON a par ailleurs été élu à la présidence de la section 20 du CNRS, à la présidence du Conseil de Département Terre Océan Atmosphère Espace du CNRS et il représente ce Département au Conseil Scientifique du CNRS.

Le prix Huntsman d'Océanographie lui a été attribué par l'Institut Océanographique de Bedford et l'Académie des Sciences du Canada. A l'occasion de la remise du prix, il a donné deux conférences, l'une à Halifax, l'autre à Ottawa, au mois d'avril 1988. La médaille d'océanographie du Prince Albert 1^{er} de Monaco lui a également été décernée.

PUBLICATIONS

T. AIFA, *Paléomagnétisme en zones de collision : déformations récentes dans l'arc Thyrrhénien et raccourcissement crustal hercynien en Afrique (thèse ès Science, Université Paris VII et Mém. Sc. Terre, n° 87-29, 184 p, 1987).*

T. AIFA, H. FEINBERG, J.P. POZZI, *A new paleopode for Africa at the Devonian/Carboniferous boundary : implications for hercynian geodynamics (EUG IV, Strasbourg, abstract in Terra Cognita, 7, 177-178, 1987).*

T. AIFA, P. BARRIER, H. FEINBERG, J.P. POZZI, *Paléomagnétisme des terrains sédimentaires plio-quadernaires du détroit de Messine, in « Le Déroit de Messine (Italie). Evolution tectono-sédimentaire récente (Pliocène et Quaternaire) et environnement actuel » (Doc. Trav. IGAL, 11, 83-90, 1987).*

J. ANGELIER & P. HUCHON, *Enregistrement tectonique des variations cinématiques dans une zone de convergence : les péninsules de Boso et de Miura (Japon central) (Bull. Soc. géol. France, t. III, 8 (3), 523-524, 1987).*

R. BIANCHI, A. CORADINI, C. FEDERICO, G. GIBERTI, P. LANCIANO, J.P. POZZI, G. SARTORIS AND R. SCANDONE, *Modeling of Surface Deformation in Volcanic Areas : the 1970-1972 and 1982-1984 Crises of Campi Flegrei, Italy (J. Geophys. Res., 92, B13, 14, 139-14, 150, 1987).*

J.P. CADET, J. CHARVET & L. JOLIVET, *Introduction à la séance spécialisée de la Société Géologique de France : « Géologie et géodynamique du Japon » (3, 473-475, 1987).*

J.P. CADET, K. KOBAYASHI, J. AUBOUIN, J. BOULEGUE, C. DEPLUS, J. DUBOIS, R. VON HUENE, L. JOLIVET, T. KANAZAWA, J. KASAHARA, K. KOIZUMI, S. LALLEMAND, Y. NAKAMURA, G. PAUTOT, K. SUYEHRO, S. TANI, H. TOKUYAMA & T. YAMAZAKI, *The Japan trench and its juncture with the Kuril trench : cruise results of the Kaiko project, Leg 3* (*Earth Planet. Sci. Lett.*, 83, 267-284, 1987).

J.P. CADET, K. KOBAYASHI, J. AUBOUIN, J. BOULEGUE, J. DUBOIS, R. VON HUENE, L. JOLIVET, T. KANAZAWA, J. KASAHARA, K. KOIZUMI, S. LALLEMAND, Y. NAKAMURA, G. PAUTOT, K. SUYEHRO, S. TANI, H. TOKUYAMA & T. YAMAZAKI, *Normal faulting of Daiichi Kashima seamount in the Japan trench revealed by the Kaiko I cruise (Leg. 3)*. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 83, 257-266, 1987).

J.P. CADET, K. KOBAYASHI, S. LALLEMAND, L. JOLIVET, J. AUBOUIN, J. BOULEGUE, J. DUBOIS, H. HOTTA, T. ISLHII, K. KONISHI, N. NIITSUMA & H. SHIMAMURA, *Deep scientific dives in the Japan and Kuril trenches* (*Earth Planet. Sci. Lett.*, 83, 313-328, 1987).

J.P. CADET, S. LALLEMAND, L. JOLIVET & K. KOBAYASHI, *Subduction, collapse tectonics and tectonic erosion in the Japan trench (Kaiko program)* (*EUG, Strasbourg, Terra Cognita*, 7, 309, 1987).

N. CHAMOT-ROOKE, V. RENARD and X. LE PICHON, *Magnetic anomalies in the Shikoku Basin* (*Earth Planet. Sc. Lett.*, 83, 214-228, 1987).

N. CHAMOT-ROOKE, S. LALLEMAND et X. LE PICHON, *Zenisu ridge : a case of recent intraoceanic deep thrusting, structural analysis and mechanical interpretation* (*EUG fourth meeting. Abstract in Terra Cognita*, vol. 7, n° 2-3, p. 309, 1987).

H. FEINBERG, *The Eocene-Oligocene passage zone in Northern Morocco*. In *Geological events at the Eocene-Oligocene boundary* (Ch. Pomerol ed., Elsevier sp. pub., 171-180).

H. FEINBERG, T. AIFA, J.P. POZZI, *Miocène-Pléistocène evolution of the Thyrrenian arc : paleomagnetic determination of uplift and rotational deformations* (*EUG IV Strasbourg, abstract in Terra Cognita*, 7, 374, 1987).

P. HUCHON & J. ANGELIER, *From subduction to collision : the Suruga-Fujigawa belt, Izu collision zone, central Japan* (*Bull. Soc. géol. France*, t. III, 8 (3), 511-521, 1987).

P. HUCHON & X. LE PICHON, *Causes and amplitude of Mesozoic and Cenozoic sea level changes* (*Terra Cognita*, 7 (2-3), 153, 1987).

P. HUCHON, *Le programme Kaiko* (*Universalia* 87, 276-281, 1987).

L. JOLIVET & J.P. CADET, *Tectonic evolution of the Hokkaido Central Belt : a model* (*Bull. Soc. géol. France*, 3, 487-497, 1987).

L. JOLIVET, S. LALLEMAND & J.P. CADET, *Tectonic evolution of western Pacific marginal basins : Japan sea as a case study (EUG, Strasbourg, Terra Cognita, 7, 116, 1987).*

KAIKO II Research Group, *6 000 meters deep : a trip to the japanese trenches (Tokyo University Press / IFREMER / CNRS, 104 pp., 1987).*

S. LALLEMAND, J.P. CADET & L. JOLIVET, *Geodynamic evolution of the northeast continental margin during Cenozoic times : new insights (Bull. Soc. géol. France, 3, 499-509, 1987).*

S. LALLEMAND & X. LE PICHON, *The Coulomb wedge model applied to subduction of seamounts in the Japan Trench (Geology, 15, 1065-1069, 1987).*

S. LALLEMAND, X. LE PICHON et S. LALLEMAND, *Tectonic context of fluid venting along japanese trenches. Poster at EUG fourth meeting (Abstract in Terra Cognita, vol. 7, n° 2-3, p. 311-312, 1987).*

X. LE PICHON, K. KOBAYASHI, J.P. CADET, J.T. IYAMA K. NAKAMURA, G. PAUTOT, V. RENARD & the KAIKO Scientific crew, *Introduction to KAIKO Special Issue (Earth Planet. Sci. Lett., 83, 183-185, 1987).*

X. LE PICHON, N. LYBERIS & F. ALVAREZ, *Discussion on the subsidence of the North Aegean trough : an alternative view, Journal of the Geological Society, London, 144, 349-351, 1987).*

X. LE PICHON & F. BARBIER, *Passive margin formation by low-angle faulting within the upper crust : the Northern Bay of Biscay margin, Tectonics, 6, 133-150, 1987).*

X. LE PICHON & P. HUCHON, *Central Japan triple junction revisited (Tectonics, 6 (1), 35-45, 1987).*

X. LE PICHON & P. HUCHON, *Reply (Tectonics, 6 (2), 213-214, 1987).*

X. LE PICHON, T. IYAMA, H. CHAMLEY, H. CHARVET, M. FAURE, H. FUJIMOTO, T. FURUTA, Y. IDA, H. KAGAMI, S. LALLEMAND, J. LEGGETT, A. MURATA, H. OKADA, C. RANGIN, V. RENARD, A. TAIRA & H. TOKUYAMA, *Nankai Trough and the fossil Shikoku Ridge : results of Box 6 Kaiko survey (Earth Planet. Sci. Lett., 83, 186-198, 1987).*

X. LE PICHON, T. IYAMA, H. CHAMLEY, H. CHARVET, M. FAURE, H. FUJIMOTO, T. FURUTA, Y. IDA, H. KAGAMI, S. LALLEMAND, J. LEGGETT, A. MURATA, H. OKADA, C. RANGIN, V. RENARD, A. TAIRA & H. TOKUYAMA, *The Eastern and Western ends of Nankai Trough : results of Box 5 and Box 7 Kaiko survey (Earth Planet. Sci. Lett., 83, 199-213, 1987).*

X. LE PICHON, T. IYAMA, S. LALLEMAND, J. BOULEGUE, J. CHARVET, M. FAURE, K. KANO, H. OKADA, C. RANGIN, A. TAIRA, T. URABE et S. UYEDA, *Nankai Trough and Zenisu ridge : a deep-sea submersible survey (Earth Planet. Sci. Lett., vol. 83, 285-299, 1987).*

X. LE PICHON, T. IYAMA, S. LALLEMANT, J. BOULEGUE, J. CHARVET, M. FAURE, K. KANO, H. OKADA, C. RANGIN, A. TAIRA, T. URABE & S. UYEDA, *Observation par submersible de structures tectoniques et de sorties de fluides associés à une zone de subduction (prisme d'accrétion de Nankai, Japon méridional) : résultats de la campagne Kaiko, (Leg. 1, CR Acad. Sc. Paris, ser. II, 305, 1285-1293, 1987).*

K. NAKAMURA, V. RENARD, J. ANGELIER, J. AZEMA, J. BOURGOIS, C. DEPLUS, K. FUJIOKA, Y. HAMANO, P. HUCHON, H. KINOSHITA, P. LABAUME, Y. OGAWA, T. SENO, A. TAKEUCHI, M. TANAHASHI, A. UCHIYAMA & J.L. VIGNERESSE, *Oblique and near collision subduction, Sagami and Suruga troughs — Preliminary results of French-Japanese 1984 KAIKO cruise (Leg. 2, Earth Planet. Sc. Lett., 229-242, 1987).*

G. PAUTOT, K. NAKAMURA, P. HUCHON, J. ANGELIER, J. BOURGOIS, K. FUJIOKA, T. KANAZAWA, Y. NAKAMURA, Y. OGAWA, M. SEGURET & A. TAKEUCHI, *Deep-sea submersible survey in the Suruga, Sagami and Japan trenches : Preliminary results of the 1985 KAIKO cruise (Leg. 2, Earth Planet. Sc. Lett., 300-312, 1987).*

G. PAUTOT, K. NAKAMURA, P. HUCHON, J. ANGELIER, J. BOURGOIS, K. FUJIOKA, T. KANAZAWA, Y. NAKAMURA, Y. OGAWA, M. SEGURET & A. TAKEUCHI, *Observations par submersible des zones de subduction au sud-est du Japon : résultats préliminaires de la campagne franco-japonaise Kaiko 1985 (Leg. 2, CR Acad. Sc., ser. II, 305, 1321-1326).*

V. RENARD, K. NAKAMURA, J. ANGELIER, J. AZEMA, J. BOURGOIS, C. DEPLUS, K. FUJIOKA, Y. HAMANO, P. HUCHON, H. KINOSHITA, P. LABAUME, Y. OGAWA, T. SENO, A. TAKEUCHI, M. TANAHASHI, A. UCHIYAMA & J.L. VIGNERESSE, *Trench triple junction off central Japan — Preliminary results of French-Japanese 1984 KAIKO cruise (Leg. 2, Earth Planet. Sc., Lett., 243-256, 1987).*

J.C. SIBUET, J.P. MAZE, P. AMORTILA and X. LE PICHON, *Physiography and structure of the Western Iberian continental margin of Galicia, from seabeam and seismic data, Proceedings, Initial Reports (Part A), of the Ocean Drilling Program, 103, 77-97, 1987.*