

## Géodynamique

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

### *COURS : La collision*

Le cours de l'année 1991-1992 a été consacré à la collision continentale. Six cours ont été donnés au Collège de France à Paris et trois cours ont été donnés à l'Université de Rennes les 23, 24 et 25 mars 1992 dans le cadre d'un séminaire organisé pour cette occasion. Le problème principal abordé dans le cours était celui de la cinématique des chaînes de montagnes. L'absence de cinématique quantitative de ces chaînes rend toute modélisation thermomécanique hautement hypothétique et explique que l'orogénie, qui était à l'origine des théories antérieures de la Terre, ait été jusqu'à présent un sujet mineur de la Tectonique des Plaques. Aujourd'hui, la géodésie spatiale apporte la possibilité d'établir une cinématique précise des chaînes, donc d'aboutir à une modélisation thermomécanique raisonnable. Dans ce contexte, on s'est attaché à établir un bilan de masse préliminaire des chaînes alpino-himalayennes. En dépit des marges d'erreur très larges, ce bilan pourrait ouvrir la voie à une interprétation nouvelle des chaînes. Celles-ci pourraient correspondre à des « puits » de matière transférant de grandes quantités de croûte inférieure dans le manteau.

Après avoir évalué nos connaissances actuelles concernant la cinématique de la collision de la chaîne alpino-himalayenne, et en bilan total, et en répartition, on s'est attaché à décrire la topographie, qui est l'expression la plus évidente de la collision. En effet, comme l'isostasie régionale est bien préservée, la topographie traduit directement en surface l'excès de croûte stocké dans les racines des chaînes. La variation systématique de la topographie depuis les Alpes jusqu'à l'ensemble Himalaya-Tibet est soulignée. On montre qu'en première approximation les chaînes peuvent être décrites comme des prismes d'accrétion caractérisés par une pente critique. La question principale posée à la fin de cet examen concerne la nature du régime cinématique

actuel. Est-on en régime permanent ou transitoire ? Il semble bien qu'il s'agisse d'un régime semi-permanent où l'évolution cinématique, si elle existe, est très faible.

Une deuxième partie considère un bilan de masse des Alpes et de l'Himalaya, après avoir pris l'exemple de Taiwan comme celui d'une chaîne en régime permanent. Un bilan de masse exige une estimation de l'érosion pour déterminer si la quantité de matière enlevée par érosion est équivalente à celle entrant dans la chaîne. La réponse semble négative, dans le cas des Alpes comme dans celui de l'Himalaya. Il y aurait donc perte de croûte inférieure, ou vers le bas dans le manteau, ou latéralement vers le plateau adjacent, si la chaîne ne croît plus de manière significative, ce qui semble bien être le cas.

Une troisième partie examine alors le bilan de masse de la collision Inde-Asie en estimant la quantité de raccourcissement total à partir de la topographie, dans l'ensemble de l'Asie affecté par la collision de l'Inde et en tenant compte de l'érosion. Le déficit probable se situe entre 1 et 2 millions de km<sup>2</sup> de surface de raccourcissement et l'extrusion latérale du continent chinois ne peut rendre compte de plus de la moitié de ce déficit. Il reste donc un déficit probable d'environ cinq cent mille à un million de km<sup>2</sup> qu'il faut sans doute attribuer à l'Himalaya bien que les incertitudes encore grandes empêchent d'en être certain.

Une quatrième partie, enfin, présentée à Rennes, discute la structure même d'une chaîne de montagne en tenant compte des transformations métamorphiques et rhéologiques de la croûte dues à l'évolution dans le temps de la pression et de la température. Il est montré que la profondeur de la racine de la chaîne ne peut dépasser 50 à 70 kilomètres en fonction de la température. Au-delà de cette profondeur, le matériau crustal éclogitisé atteint une densité supérieure à celle du manteau et, physiquement, ne peut plus appartenir à la croûte. La température peut d'ailleurs empêcher la racine d'atteindre cette profondeur limite lorsqu'elle s'élève au-dessus de 700 à 800 °C, entraînant une ductilité qui permet l'étalement de la racine. Ainsi les chaînes deviennent-elles des « puits » pour la croûte inférieure.

Des notes de cours ont été distribuées aux participants.

### 1. Cinématique et Topographie

De Mets *et al.* (1990) estiment à 0,27 km<sup>2</sup>a<sup>-1</sup> la convergence le long des 11 700 km de frontière de la zone alpino-himalayenne, soit une vitesse moyenne de 2,3 cma<sup>-1</sup>. La collision absorbe donc environ 10 % de la convergence totale entre plaques. En fait, la vitesse moyenne de raccourcissement augmente rapidement d'ouest en est de 0,50 cma<sup>-1</sup> à 5 cma<sup>-1</sup> en passant de l'affrontement Afrique-Eurasie à l'affrontement Inde-Eurasie.

Il est important pour un bilan de masse de connaître la durée totale de la collision continentale observée. On s'intéresse à une collision entre croûtes continentales d'épaisseur suffisante pour que le continent émerge. L'émergence du continent entraîne l'absence de sédiments marins et ce critère permet de dire que, pour les Alpes comme pour l'Himalaya, la collision continentale a commencé il y a 45 Ma. Alors, la surface de raccourcissement totale est de  $0,35 \text{ Mkm}^2$  pour les Alpes (soit 350 km de raccourcissement linéaire perpendiculaire à la chaîne en moyenne) et  $5 \text{ Mkm}^2$  pour l'Himalaya (soit 2 200 km en moyenne). On retrouve ce rapport proche de 10 entre les quantités de convergence le long de l'Himalaya et le long des Alpes.

Cette augmentation rapide de la convergence vers l'est s'accompagne d'une extension de la déformation à une zone très large qui atteint dix  $\text{Mkm}^2$  dans le cas de la collision Inde-Asie. La question, qui se pose alors, question non encore résolue, est la part de raccourcissement qui est absorbée dans les chaînes principales.

La topographie de la chaîne principale montre également une évolution progressive d'ouest en est. On passe, pour les Alpes, d'une chaîne isolée à profil triangulaire à une chaîne qui n'est plus que l'escarpement d'un large plateau d'altitude uniforme dans le cas de l'Himalaya. Le Zagros présente une topographie intermédiaire. La largeur de la chaîne est constante, environ 250 km, mais son altitude moyenne, et donc la profondeur de sa racine, augmentent vers l'est. La pente moyenne est assez constante et de l'ordre de 3 %.

En première approximation, la chaîne peut être considérée comme un prisme de pente constante (cas de l'Himalaya), ou un double prisme (cas des Alpes), comparables aux prismes d'accrétion des zones de subduction. On a donc cherché à modéliser les chaînes comme des prismes qui seraient contrôlés soit par le seuil de fracturation (prisme de Coulomb), soit par le seuil de plasticité, soit par une combinaison des deux. Si le prisme repose sur une plaque à résistance mécanique limitée, il faut de plus introduire une condition supplémentaire pour tenir compte de la compensation isostatique régionale. Une difficulté non résolue dans ces modèles vient de ce que la pente moyenne ne change pas avec l'approfondissement de la racine alors qu'on attendrait un aplatissement lorsque la base de la racine atteint le seuil de plasticité.

Une question fondamentale concerne la nature permanente ou transitoire du régime cinématique. Le volume des Alpes correspond à 8 Ma de convergence et 12 Ma pour l'Himalaya alors que la convergence continentale a commencé il y a 45 Ma dans les deux cas. Ces chiffres suggèrent que ces deux chaînes sont proches du régime permanent. Mais l'érosion est-elle suffisante pour enlever une telle quantité de croûte ?

## 2. *Erosion et bilan de masse des chaînes*

Si les chaînes sont proches d'un régime permanent, le flux de matière sortant doit être proche du flux entrant. Le flux sortant le plus évident est celui dû à l'érosion. Il peut aussi y avoir un flux sortant par le bas (par éclogitisation) et un flux latéral (par écoulement ductile de la croûte inférieure sous le gradient de pression topographique). Ces deux derniers flux sont impossibles à déterminer quantitativement. Ils ne peuvent être estimés que par différence, une fois évaluée la quantité d'érosion dans les chaînes.

En première approximation, on peut admettre une érosion de la forme

$$R = - KE dt$$

où  $E$  est l'élévation et  $K$  une constante choisie de manière à obtenir le volume de sédiments érodés effectivement mesuré. On a alors

$$dE/dt = - KE/f_c$$

où  $f_c$ , la constante isostatique, est voisine de 7. Pour les Alpes et l'Himalaya,  $K \sim 0,3 \text{ Ma}^{-1}$ . En l'absence de convergence, avec une telle loi, ces chaînes seraient détruites par l'érosion en environ 45 Ma.

Un exemple remarquable de chaîne en régime permanent, dans laquelle l'érosion équilibre la convergence, est la chaîne de Taiwan. C'est une chaîne à très forte convergence ( $70 \text{ km Ma}^{-1}$ ) mais faible épaisseur d'accrétion. C'est donc en fait un prisme d'accrétion sédimentaire subaérien. L'érosion très forte détruirait la chaîne en 10 Ma. Elle suscite vers l'arrière de la chaîne une composante verticale de la vitesse des roches qui atteint 8 % de la vitesse d'entrée. Le temps de résidence maximal des roches dans la chaîne est alors de 10 Ma. Les roches dont l'origine est la plus profonde proviennent de 20 km de profondeur et ont atteint un métamorphisme de schistes verts correspondant à une température maximale de près de 300 °C. La modélisation montre que cette température ne peut être atteinte que si l'on tient compte de la chaleur de friction.

Si l'on utilise un modèle cinématique comparable pour l'Himalaya, en admettant que la chaîne est proche de l'équilibre permanent, l'altitude actuelle est acquise dès la fin de l'Oligocène mais la quantité totale de matériau érodé, 23 000 km<sup>2</sup> par section, est plus du double des estimations les plus généreuses. Elle correspondrait à une moyenne de plus de 70 km d'épaisseur. Ce n'est pas le cas. Ce simple fait indique qu'il faut introduire une perte de croûte inférieure vers le bas ou sur le côté à peu près égale à la perte de croûte supérieure par érosion.

Il est malheureusement difficile d'obtenir une estimation précise de la quantité d'érosion sur les chaînes. On peut tenter cette estimation par la charge sédimentaire actuelle des fleuves ramenée à la surface de la chaîne. On obtient des taux allant de 0,3 mma<sup>-1</sup> pour les Alpes à 1,1 mma<sup>-1</sup> pour

l'Himalaya. On peut aussi utiliser le contenu total des bassins dont le remplissage résulte de l'érosion de la chaîne. On obtient de l'ordre de  $1 \text{ M km}^3$  pour les Alpes et  $15 \text{ à } 20 \text{ M km}^3$  pour l'Himalaya, soit respectivement environ  $0,2 \text{ mma}^{-1}$  et  $0,6 \text{ mma}^{-1}$ . On peut enfin supposer que la chaîne est en équilibre et que les taux de soulèvement géodésiques correspondent aux taux d'érosion moyen. Mais cette dernière méthode est peu fiable car la surrection actuelle pourrait être dominée par le réajustement glaciaire.

On conclut que les taux moyens d'érosion n'ont pas dépassé  $1 \text{ mma}^{-1}$  pour l'Himalaya et  $0,3\text{-}0,4 \text{ mma}^{-1}$  pour les Alpes et que des reliefs comparables aux reliefs actuels existaient dès l'Oligocène Supérieur. En conséquence, si l'estimation cinématique est correcte, il doit y avoir une perte de croûte inférieure à peu près équivalente à la perte de croûte supérieure par érosion.

### 3. Bilan de masse de la collision Inde-Asie

Un bilan de masse de la collision Inde-Asie serait possible à établir si la totalité du raccourcissement se traduisait par un épaissement de croûte. En effet, puisque l'isostasie régionale est préservée, on peut alors se servir de la topographie pour déterminer la quantité totale de raccourcissement et la comparer au raccourcissement calculé à partir de la cinématique. Si le raccourcissement trouvé est inférieur au raccourcissement cinématique, on peut alors attribuer ce déficit à l'expulsion latérale de la croûte proposée par Tapponnier et Molnar. Mais, du fait de la possibilité d'une éclogitisation importante de la croûte inférieure dans les chaînes, on peut considérer que ce déficit impose une borne supérieure à l'effet combiné de l'extrusion latérale de la péninsule indochinoise et de la Chine et de l'éclogitisation de la croûte inférieure dans les chaînes.

L'analyse cinématique conduit à estimer le raccourcissement à  $6 \text{ Mkm}^2$  depuis le début de la collision continentale il y a 45 millions d'années. L'analyse topographique peut rendre compte de  $4 \text{ à } 5 \text{ Mkm}^2$  de raccourcissement. Le déficit est de l'ordre de  $1,5 \text{ Mkm}^2 \pm 0,5$ . Deux tiers de ce déficit ( $1 \text{ Mkm}^2$ ) proviennent de l'Himalaya mais pourraient dans une proportion significative correspondre à un transfert de croûte inférieure vers le Tibet, suivant le modèle de Zhao et Morgan (1985).

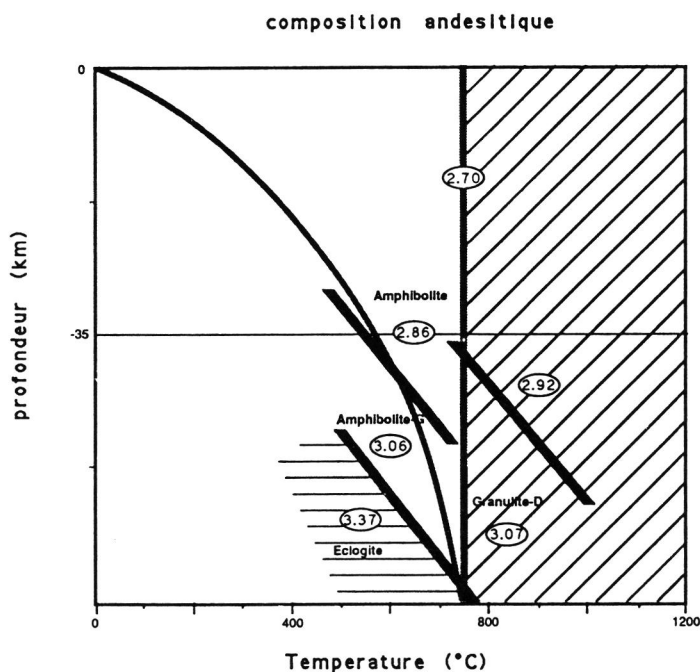
L'extrusion de la péninsule indochinoise proposée par Tapponnier *et al.* (1982) ne peut rendre compte de plus de  $0,3 \text{ Mkm}^2$  de raccourcissement du fait de la forme en coin de ce bloc. L'extrusion latérale de la Chine pourrait représenter entre 1 et  $1,6 \text{ cma}^{-1}$  depuis 25 Ma soit  $0,25 \text{ à } 0,45 \text{ Mkm}^2$ . L'extrusion totale ne rend donc pas compte de plus de 10 à un maximum de 15 % du raccourcissement alors que le déficit est de  $25 \pm 8 \%$ . Il faut donc probablement admettre que la perte de croûte dans le manteau rend compte d'environ la moitié du déficit bien que l'incertitude sur ces chiffres interdise de rien affirmer à l'heure actuelle.

#### 4. Le rôle de la croûte inférieure

La topographie de la chaîne n'est que l'expression en surface de la présence d'une racine de volume environ six fois supérieure à la topographie. Le problème de la formation d'une chaîne de montagne se ramène donc à celui de la croissance de sa racine. Quels sont les facteurs limitant cette croissance ?

Le premier facteur est rhéologique. Si la ductilité de la croûte inférieure devient suffisante, celle-ci va s'écouler sous l'effet du gradient de pression. Or cette ductilité dépend exponentiellement de la température et est d'autant plus forte que la teneur en quartz est élevée. Pour les matériaux de la croûte, au-delà de 750 à 800 °C, la ductilité devient si forte que l'écoulement latéral de la racine empêche sa croissance vers le bas.

Le second facteur est chimique. A pression croissante, l'apparition de phases minérales plus denses, et en particulier du grenat, va augmenter la densité moyenne de la croûte. Au-delà de 50 à 70 km de profondeur, en fonction de la température, la croûte est éclogitisée et sa densité peut dépasser significativement celle du manteau pour une croûte inférieure suffisamment basique. Il y a donc de fait transfert de cette portion de croûte éclogitisée dans le manteau et limitation de la croissance de la racine.



La figure montre le champ de ces transformations rhéologiques et chimiques dans le cas d'une croûte de composition moyenne andésitique. La variation de température en fonction de la profondeur indiquée pour la croûte est la variation qui donnerait la plus grande épaisseur de racine, soit environ 70 km. Si la température dépasse 750 °C, le fluage latéral empêche la croissance de la racine de progresser. Il y a donc un triangle T - Z assez limité à l'intérieur duquel la racine peut croître.

Au cours de la croissance de la racine, on peut attendre un réchauffement progressif, dû à la désintégration des éléments radioactifs et à la production de chaleur par cisaillement. La racine devrait donc progressivement croître au cours du temps pour atteindre un maximum au-delà duquel la chaîne ne pourra croître que par fluage latéral.

Il faut noter enfin que ces processus sont sélectifs. L'éclogitisation élimine préférentiellement les matériaux les plus basiques alors que le fluage latéral affecte de manière privilégiée les matériaux à la teneur en quartz maximale. Les Alpes pourraient représenter une chaîne à racine plus chaude affectée par le fluage latéral vers le Tibet.

Les chaînes pourraient donc être des puits par lesquels la croûte inférieure disparaîtrait dans le manteau ce qui aurait des implications majeures sur le plan dynamique (force de traction sous les chaînes) aussi bien que chimique (bilan chimique du manteau).

X. L.P.

#### SÉMINAIRES À PARIS (Janvier 1992-Février 1992)

8 Janvier, « Modélisation et Collision Continentale » avec P. Davy de l'Université de Rennes.

15 Janvier, « La collision tectonique archéenne : exemple de l'Afrique du Sud » avec M.P. Coward de l'Imperial College à Londres.

22 Janvier, « Déformation de la lithosphère en Asie » avec P. Tapponnier de l'Institut de Physique du Globe de Paris

29 Janvier, « Tectonique de l'Himalaya : Evolution temporelle MCT-MBT et production de granites » avec P. Le Fort de l'Université de Grenoble.

5 Février, « Métamorphisme et évolution profonde des Alpes » avec B. Goffé de l'Ecole Normale Supérieure.

12 Février, « Cinématique de la collision de l'Inde et sismicité » avec P. Molnar du MIT, Cambridge, aux Etats-Unis.

## ACTIVITÉS SCIENTIFIQUES de Juin 1991 à Mai 1992

Xavier Le Pichon dirige le laboratoire de Géologie de l'Ecole Normale Supérieure qui correspond à une Unité Associée au CNRS. Le laboratoire regroupe 30 chercheurs et enseignants répartis en quatre équipes. Seules certaines des activités plus directement liées au travail de Xavier Le Pichon sont brièvement rappelées ci-dessous. Un rapport d'ensemble rédigé pour le CNRS est disponible sur demande.

**a) Etude de la Subduction**

Ce programme à long terme s'est poursuivi avec des plongées utilisant le submersible japonais en juillet 1991 dans la fosse de Nankai. Ces plongées ont montré que la zone de sorties abondantes de fluide en bordure du prisme, découverte durant la campagne Kaiko-Nankai, se prolongeait latéralement sur plus d'un kilomètre vers le nord est. Un nouveau programme de recherche franco-japonais, intitulé Kaiko-Tokai, a été proposé. Ce programme, toujours dans la partie orientale de la fosse de Nankai, a pour but d'examiner plus spécifiquement les phénomènes directement liés à la rupture attendue du prochain grand séisme de Tokai. On explorera en particulier de grands escarpements de failles entre 1 000 et 2 000 mètres de profondeur, qui bordent le prisme d'accrétion sur sa partie interne et correspondent probablement à l'affleurement du grand plan de chevauchement sismique. Deux plongées, effectuées en mai 1992 par deux chercheurs français (J.P. Cadet et M. Fournier) avec le submersible Shinkai 6500, confirment qu'un des grands escarpements est bien une faille de chevauchement actif.

La campagne Manon, en mars 1992, avec le nouveau navire d'Ifremer, l'Atalante, et le submersible Nautil, a permis de quantifier de manière plus précise les sorties massives de fluide qui se produisent dans un champ de boue diapirique vers 14°N au front du prisme d'accrétion de la Barbade. Il apparaît que ces sorties de fluides sont dues à l'arrivée sous le prisme d'un relief important du socle, relief correspondant à une zone de fracture, qui joue le rôle d'un drain. Les données thermiques et chimiques permettent de modéliser l'advection des fluides et d'en établir un bilan quantitatif. Des hydrates de méthane (clathrates) ont été prélevées en surface d'un des volcans de boue et permettront de préciser l'origine de ces gaz.

Avec Pierre Henry, nous avons présenté un nouveau modèle permettant de rendre compte de l'érosion du prisme d'accrétion par le bas sous l'effet de surpressions de fluide. Ce modèle est en cours de publication. L'ensemble des résultats de la campagne Kaiko-Nankai vient d'être publié dans un numéro spécial d'EPSL.



**b) Collision**

Un bilan quantitatif de la collision de l'Inde avec l'Asie a été tenté par le biais d'une étude cinématique et topographique (cf. notes sur le cours, plus haut). Une publication est en cours sur le sujet.

L'étude de l'évolution temporelle d'une racine de chaîne de montagne, en fonction de la température et de la pression, en tenant compte des réactions métamorphiques et de l'évolution rhéologique est en cours.

**c) Cinématique et Géodésie Spatiale**

Un programme de mesures des déformations en Asie du Sud Est utilisant le GPS a été proposé à la Communauté Européenne. Il se place dans le cadre d'un accord de coopération CEE-ASEAN et couvrirait l'ensemble des pays de l'ASEAN, de la Thaïlande aux Philippines.

**d) Ouverture de la Mer de Chine et évolution géodynamique tertiaire du Vietnam du Sud**

Le programme de terrain se poursuit à terre sous la direction de Claude Rangin. Une campagne à la mer est prévue en mai de l'année 1993. Les premiers résultats à terre permettent déjà de montrer que le champ de contraintes sur l'ensemble du Vietnam Sud est très homogène et qu'il change de manière caractéristique au cours du Tertiaire bien que les problèmes de datation restent difficiles.

## ACTIVITÉS DIVERSES

Xavier Le Pichon a donné les conférences suivantes :

9 Juillet : Conférence au Colloque « Future Challenges on Scientific Ocean Drilling » à La Jolla, Californie.

5-14 Octobre : Interventions dans le cadre d'un atelier de la CEE-ASEA qu'il présidait à Jakarta, Indonésie. L'objet de l'atelier était la mise au point d'un programme de géodésie spatiale couvrant l'Asie du Sud-Est.

18-24 Novembre : Conférence dans le cadre d'un Atelier sur l'amincissement de la croûte continentale tenu à Erice, Sicile.

2 Décembre : Séminaire à Oxford.

7 Avril : Conférence au Conseil Scientifique de Schlumberger à Paris.

8 Avril : Conférence à l'Ecole de Géodésie à Evry.

22 Avril : Conférence pour le MURS à la Sorbonne.

29 Avril : Conférence à l'Institut Français du Pétrole.

11 au 15 Mai : Communications dans le cadre de la réunion de l'American Geophysical Union, à Montréal, Canada.

21 Mai : Conférence à l'Université d'Edinburgh.

26 Mai : Communication au Colloque J. Dercourt de l'Académie des Sciences.

Du 17 au 30 Juillet 1991, il a participé à une campagne océanographique japonaise et a effectué une plongée sur le sous-marin Shinkai 6500 dans le fosse de Nankai.

Du 13 Février au 12 Mars 1992, il a codirigé la campagne Manon sur l'Atalante, au large de la Barbade et a effectué trois plongées avec le sous-marin Nautille.

#### PUBLICATIONS

1991

AUZENDE J.-M., URABE T., BENDEL V., DEPLUS C., EISSEN J.-P., GRIMAUD D., HUCHON Ph. *et al.*, *In situ geological and geochemical study of an active hydrothermal site on the North Fiji basin.* (*Mar. Geol.*, 98, 259-269, 1991).

BARRIER E., HUCHON P., AURELIO M., *Philippine fault : a key for Philippine kinematics.* (*Geology*, 19, 32-35, 1991).

CLUZEL D., JOLIVET L., CADET J.-P., *Early Middle Paleozoic intraplate orogen in the Ogcheon belt (S. Korea). A new insight on the Paleozoic build up of East Asia.* (*Tectonics*, 10, 1030-1051, 1991).

COCHRAN J.R., GAULIER J.-M., LE PICHON X., *Crustal structure and the mechanism of extension in the Northern Red Sea. Constraints from gravity anomalies.* (*Tectonics*, 10, 1018-1037, 1991).

FOURNIER H., JOLIVET L., GOFFE B., DUBOIS R., *The alpine Corsica metamorphic core complex.* *Tectonics*, 10, 1173-1186, 1991).

GAULIER J.-M., HUCHON Ph., *Tectonic evolution of Afar triple junction.* (*Bull. Soc. Géol. Fr.*, 162, 451-464, 1991).

GIRARD M., JOLIVET L., KAKAGAWA M., AGUIRRE L., NIIDA K., *Acidic volcanic products in Lower Cretaceous deposits of the Sorachi-Yezo Belt, Hokkaido, Northeast Japan.* (*J. Geol. Soc. Jpn.*, 97, 1-14, 1991).

**HENRY P.**, *Circulation des fluides dans les prismes d'accrétion : estimation du flux sortant et modélisation*. Thèse Doct. Univ. P. et M. Curie, Paris, 1991.

**HENRY P.**, **LE PICHON X.**, *Fluid flow along a decollement layer : a model applied to the 16°N section of the Barbados accretionary wedge*. (*J. Geophys. Res.*, 6507-6528, 1991).

**HUCHON P.**, **JESTIN F.**, **CANTAGREL J.-M.**, **GAULIER J.-M.**, **AL KHIRBASH S.**, **GAFANEH A.**, *Extensional deformations in Yemen since Oligocene and the Africa-Arabia-Somalia triple junction*. (*Ann. Tectonicae*, 5, 141-163, 1991).

**JOLIVET L.**, **HUCHON P.**, **BRUN J.-P.**, **CHAMOT-ROOKE N.**, **LE PICHON X.**, **THOMAS J.-C.**, *Arc deformation and marginal basin opening, Japan Sea as a case study*. (*J. Geophys. Res.*, 96, B3, 4367-4384, 1991).

**JOLIVET L.**, **DANIEL J.-M.**, **FOURNIER M.**, *Geometry and kinematics of extension in alpine Corsica*. (*Earth Planet. Sci. Lett.*, 104, 278-291, 1991).

**LE PICHON X.**, *Introduction to the publication of the extended outline of Jason Morgan's April 17, 1967. American Geophysical Union paper on « Rises, Trenches, Great Faults and crustal Blocks »*. (*Tectonophysics*, 187, 1-22, 1991).

**LE PICHON X.**, **CHAMOT-ROOKE N.**, *Extension of Continental Crust. In « Controversies in Modern Geology »*. (*Academic Press*, 313-338, 1991).

**LE PICHON X.**, **HENRY P.**, *Kaiko Nankai Scientific Crew. Water budget in Accretionary Wedges, a comparison*. (*Phil. Trans. R. Soc. London, A*, 315-330, 1991).