

Géodynamique

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

COURS : La subduction

Le cours de l'année 1990-1991 a été consacré à la subduction de la lithosphère océanique. Six cours ont été donnés au Collège de France à Paris et trois cours ont été organisés par la Maison Descartes à Amsterdam dans le cadre d'un Séminaire sur le rôle des fluides dans les zones de subduction qui s'est tenu du 5 au 8 mars, durant quatre après-midis. Le problème majeur abordé dans ce cours était celui de la nature et de l'efficacité du couplage mécanique entre la plaque chevauchante et la plaque chevauchée et le rôle joué par les fluides dans la qualité de ce couplage. Un fort couplage implique-t-il une déformation compressionnelle de la plaque chevauchante et un faible couplage une déformation extensionnelle ? Pourquoi y a-t-il érosion ou accrétion de sédiments dans un prisme d'accrétion ? La distribution érosion-accrétion est-elle liée à la distribution extension-compression ? Les sédiments jouent-ils un rôle dans la réduction des aspérités du plan de chevauchement ? Quel est le rôle des fluides dans le mécanisme d'accrétion des sédiments ?

On présentait d'abord le bilan de la subduction d'un point de vue cinématique. Il y a 49 100 km de frontières de subduction qui absorbent $3,09 \text{ km}^2$ par an à une vitesse frontale moyenne de $6,3 \text{ cm a}^{-1}$. Les deux tiers de la subduction se produisent dans le Pacifique Occidental ce qui conduirait à renouveler la totalité du manteau supérieur dans cette zone en 150 millions d'années. On abordait ensuite le problème du couplage mécanique. Kanamori et ses collaborateurs ont montré que la magnitude des séismes augmente avec la vitesse de convergence mais décroît avec l'âge de la plaque subduite. Cette relation est linéaire. Une relation comparable est obtenue en considérant l'état des déformations dans la plaque chevauchante, la déformation compressive maximale variant à peu près comme la magnitude des séismes.

On a ensuite examiné dans quelle mesure le mécanisme de la subduction est soustractif, conservatif ou additif au niveau de la plaque chevauchante sans

toutefois considérer dans ce bilan l'effet du magmatisme en arrière de la zone de subduction. On montrait qu'accrétion et érosion sont actuellement présents. Une étude récente de Von Huene et Scholl permet de fournir un bilan global indiquant que l'accrétion n'existe que là où il y a au moins un kilomètre de sédiments dans la fosse, condition qui est remplie à l'heure actuelle le long de la moitié des fosses existantes. Le point fondamental est que la subduction est un phénomène soustractif sauf lorsqu'une forte épaisseur de sédiments dans la fosse amène la création d'un prisme sédimentaire d'accrétion.

On revenait ensuite à la nature du couplage mécanique sous la marge en fonction de la présence ou non d'un prisme sédimentaire d'accrétion. En effet, le couplage mécanique devrait être plus faible sous la partie sédimentaire que sous la partie crustale. Est-ce le cas ? L'absence de séismes sous le prisme sédimentaire semble le confirmer. On devrait alors attendre une augmentation du flux de chaleur sous la partie crustale du fait d'une friction plus grande. Le problème est celui de l'importance de la contrainte cisailante sur laquelle les données ne permettent pas encore de trancher de manière sûre.

Enfin on examinait le rôle de la pression des fluides interstitiels dans les phénomènes mécaniques, la manière dont cette pression s'établit dans les prismes et la circulation qu'elle entraîne. On montrait qu'on devrait attendre de très fortes pressions proches de la pression lithostatique au niveau du décollement sous les prismes ce qui entraînerait une très faible friction. Les données, encore partielles, vont bien dans ce sens. En ce qui concerne la circulation des fluides, les mesures récentes du débit des fluides qui sortent du prisme d'accrétion donnent des valeurs très supérieures aux valeurs qui correspondraient à une simple compaction des sédiments. Toutefois, une part importante de ce flux est dû à une convection peu profonde secondaire. Il est donc difficile d'isoler la part du flux en provenance des profondeurs du prisme mais il paraît probable que ce flux profond fonctionne de manière transitoire. Une question importante reste celle de sa possible modulation par le cycle sismique.

Des notes de cours ont été distribuées aux participants.

1. Bilan cinématique de la subduction

En utilisant le modèle le plus récent (Nuvel 1), on retient 49 100 km de frontières de convergence avec une quantité de surface détruite de $2,58 \text{ km}^2 \text{ an}^{-1}$, soit une vitesse moyenne perpendiculaire à la frontière de $5,25 \text{ cm an}^{-1}$. Si l'on tient compte des bassins marginaux, ce que ne fait pas Nuvel 1, on obtient $3,09 \text{ km}^2 \text{ an}^{-1}$ et $6,3 \text{ cm an}^{-1}$. Toutefois, 8 300 km de frontières sont des frontières essentiellement transformantes. Sur les 40 800 km de frontières où la subduction est frontale, $2,97 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$ sont absorbés à un taux moyen de $7,3 \text{ cm an}^{-1}$. Ce taux de $7,3 \text{ cm an}^{-1}$ semble être

un taux caractéristique de la subduction. Il pourrait représenter une vitesse d'équilibre pour une plaque déjà âgée.

2. *Couplage mécanique abordé sous l'aspect statistique*

Kanamori et ses collaborateurs ont montré qu'il existe une relation linéaire entre la magnitude maximale des séismes M_w , l'âge de la lithosphère subduite A et la vitesse de convergence V_c . En fait, ils utilisent une valeur M'_w , légèrement corrigée par rapport à M_w pour tenir compte de la sismicité de l'ensemble de la frontière considérée. La relation est alors :

$$M'_w = - 0,009531 A + 0,143 V_c + 8,01$$

où A est en Ma et V_c en $cm\ a^{-1}$. Le coefficient de corrélation est de 0,8. L'explication physique proposée est que l'âge contrôle la densité de la plaque et donc sa vitesse de descente verticale alors que la vitesse de convergence est proportionnelle à la friction. Une difficulté toutefois vient de ce que ces statistiques ne tiennent pas compte de l'ouverture dans les bassins marginaux et qu'elles se détériorent lorsqu'on essaie d'en tenir compte, ce qui est a priori surprenant.

L'importance de ce couplage se traduit-il par une déformation permanente de la plaque chevauchante ? Dans ce cas, la déformation compressionnelle maximale devrait correspondre à l'énergie sismique maximale. Ceci avait été noté par Uyeda et Kanamori dès 1979. Ils montraient que la marge des Mariannes était de type extensionnel et avait une faible sismicité alors que la marge du Pérou était de type compressif et avait une forte sismicité. L'examen qualitatif de l'état de déformation de la marge chevauchante semble confirmer cette corrélation d'ensemble.

3. *Accrétion, érosion et couplage*

Uyeda et Kanamori pensaient pouvoir aller plus loin et associer extension à érosion de la marge chevauchante et accrétion à compression. De fait, on constate qu'il existe bien deux types de marges chevauchantes, des marges fortement affectées par l'érosion, qui sont soustractives et des marges constructives qui s'accroissent au contraire rapidement par accrétion d'un prisme sédimentaire. Un exemple de marge constructive très étudié est celui du prisme de la Barbade tandis que deux exemples de marge soustractive sont ceux du Pérou et du Japon. On constate donc qu'une zone de subduction peut se caractériser par une rapide accrétion de sédiments ou par une subduction de ces sédiments sans érosion ou même par une importante érosion de la partie crustale.

Une étude exhaustive de Von Huene et Scholl montre la répartition actuelle de ces différents types de marges. Sur les 44 000 km de fosses recensés par ces auteurs, 2 500 km correspondent à de l'accrétion et l'épaisseur moyenne

de sédiments dans la fosse y est de 2,1 km. Le long des 19 000 km restants, les sédiments sont entièrement subduits et la croûte dans un certain nombre de cas est érodée. L'épaisseur des sédiments dans la fosse dans ce cas est inférieure à 500 m. Il y a donc une corrélation évidente entre épaisseur de sédiment et présence d'un prisme. Par contre, contrairement à ce que proposaient Uyeda et Kanamori, il n'y a pas de corrélation avec le couplage sismique. Les sédiments ne jouent donc pas de rôle dans la réduction des aspérités.

On en conclut que seule, la présence d'un prisme d'accrétion peut protéger la marge de l'érosion et que ce prisme n'existe que lorsqu'une épaisseur de sédiments nettement supérieure à 1 km est présente. La présence d'une forte épaisseur de sédiments dans la fosse n'est généralement possible que lorsqu'il y règne une abondante sédimentation terrigène, la plupart du temps turbiditique. Or ce type de sédimentation s'est beaucoup accru au cours des temps glaciaires. Il s'en suit que les prismes d'accrétion devraient être plus fréquents durant l'époque glaciaire et qu'au contraire l'érosion devrait avoir été plus importante avant cette époque. Ceci devrait avoir des implications sur les bilans de la croûte continentale.

4. *Couplage mécanique - Flux de chaleur et prisme d'accrétion*

L'étude détaillée de la sismicité des prismes d'accrétion montre que ceux-ci sont essentiellement asismiques. La zone sismique, le long du plan de chevauchement, ne commence qu'au « backstop », c'est-à-dire à l'endroit où le glissement devient un glissement croûte sur croûte. Le décollement, sous le prisme, doit donc être caractérisé par un coefficient de friction très faible et ce coefficient de friction devrait beaucoup augmenter à partir du backstop.

Si V est la vitesse de subduction et τ la contrainte cisailante sur le plan de chevauchement, la quantité de chaleur produite est alors :

$$Q = V \cdot \tau$$

On peut donc en principe tester l'importance du couplage mécanique à partir de la mesure du flux de chaleur. Un modèle simple, dû à Molnar et England, permet de calculer analytiquement la température sur le plan de chevauchement. Ces auteurs trouvent des valeurs de contrainte cisailante de l'ordre 80 Mpa. Dans le cas du prisme de Taiwan, on trouve 50 Mpa correspondant à une valeur du coefficient de friction μ de 0,5. Ceci pose un problème considérable car l'énergie dépensée par friction dépasse alors l'énergie fournie par la force gravitationnelle du panneau plongeant (Slab Pull).

Les données détaillées de La Barbade et de l'Oregon semblent indiquer l'absence de réchauffement significatif par friction au niveau du décollement sous le prisme sédimentaire mais il est possible qu'un tel effet soit présent à

partir du backstop. Les données actuelles sont encore insuffisantes et les modèles utilisés trop primitifs pour trancher.

5. *Pression de fluide, décollement et accréation*

Si l'on accepte la validité de la loi de Coulomb dans le prisme, l'absence de sismicité et la faible production de chaleur par frottement conduisent à admettre que la pression des fluides est proche de la pression lithostatique au niveau du décollement.

Il existe une manière simple de vérifier la validité de la loi de Coulomb au niveau du décollement qui est de mesurer l'angle formé par les failles conjuguées. Ceci permet d'estimer à la fois la valeur du coefficient de friction μ et la direction de la contrainte maximale. Le test a été fait sur le prisme des Aléoutiennes et donne une valeur de μ de 0,45, ce qui est raisonnable.

On peut alors chercher comment varie la résistance mécanique en fonction de la profondeur dans la fosse, en avant du prisme, pour déterminer à quel niveau s'établira le décollement. On peut en effet supposer qu'il coïncidera avec le niveau de résistance mécanique minimale. Sur un plan horizontal, la contrainte cisailante nécessaire pour qu'il y ait déplacement est :

$$\tau = \mu (\sigma_v - P_f) = \mu P_e$$

où σ_v est la contrainte verticale, égale à la pression lithostatique, P_f est la pression de fluides et P_e la pression efficace. Il suffit donc de calculer la distribution de P_f .

On traite le problème de la variation de P_f avec la profondeur dans la fosse dans le cas le plus simple unidimensionnel. On montre que pour obtenir un niveau minimal de résistance à l'intérieur de la colonne sédimentaire, il faut qu'il se dépose rapidement une couche de sédiments à haute perméabilité sur une couche de sédiments à faible perméabilité. La charge rapide met les sédiments à faible perméabilité en surpression alors que les sédiments susjacentes à haute perméabilité ont une pression de fluides faible. Il s'en suit qu'un niveau de résistance minimale va apparaître dans la partie supérieure de la couche de sédiments inférieurs. Ce modèle est testé sur la fosse de Nankai, où la couche de sédiments a été forée.

6. *Fluides et prisme d'accréation*

On présente ensuite un modèle simple de compaction des sédiments dans le prisme permettant de calculer la quantité de fluide évacué en régime permanent. Les valeurs obtenues sont très faibles (au plus quelques millimètres par an) et ne peuvent affecter de manière significative le flux de chaleur. Or de nombreuses mesures détaillées du flux de chaleur révèlent des anomalies importantes qui ne peuvent s'expliquer que par une advection rapide qui

atteint 100 mètres par an. Par ailleurs, les forages ont révélé au niveau du décollement et des failles actives des indices chimiques et tectoniques d'écoulement important, sans doute transitoire. Enfin, la découverte de volcans de boue jouant le rôle de valves de dépressurisation du décollement confirme l'existence d'une circulation à très grand débit.

Le schéma simpliste d'un écoulement très lent, permanent et diffus, dû à la seule compaction, est donc faux. L'écoulement est généralement concentré le long de failles ; il est souvent relativement très rapide et transitoire. Des mesures détaillées au nez du prisme de Nankai ont permis pour la première fois d'obtenir un bilan quantitatif. La quantité de fluide venant de l'intérieur du prisme (sans doute le long du décollement puis des chevauchements frontaux) est plusieurs fois la quantité disponible par simple compaction. Cet écoulement est par ailleurs grandement augmenté par une convection secondaire peu profonde qui semble être entraînée par la faible salinité des fluides profonds.

Ces découvertes ouvrent de nouvelles perspectives à la recherche. Trois questions fondamentales sont maintenant posées.

- 1) Faut-il recharger le décollement à partir de sources externes au prisme ou des mouvements transitoires suffisent-ils à expliquer les gros débits observés ?
- 2) Quelle est l'origine des fluides à très faible chlorinité expulsés en grosse quantité ?
- 3) Y a-t-il modulation de la circulation par le cycle sismique, qu'il y ait source externe ou non.

X. L.P.

SÉMINAIRES À PARIS (Janvier-Février 1991)

9 Janvier, « Les prismes d'accrétion : l'exemple de Taiwan » avec John Suppe de l'Université de Princeton.

16 Janvier, « Subduction et érosion tectonique » avec Roland Von Huene de l'Université de Kiel.

23 Janvier, « Les forces de frontière de plaques agissant dans les zones de subduction » avec Martin Bott de l'Université de Durham.

30 Janvier, « Les informations fournies par la chimie des fluides dans les zones de subduction » avec Jacques Boulègue de l'Université Pierre et Marie Curie à Paris.

6 Février, « Normalité et anomalies dans la sismicité profonde du Pacifique Occidental » avec Domenico Giardini de l'Institut National de Géophysique à Rome.

13 Février, « Subduction et Convection » avec Henri-Claude Nataf de l'Ecole Normale Supérieure à Paris.

ACTIVITÉS SCIENTIFIQUES de Juin 1990 à Mai 1991

Xavier Le Pichon dirige le laboratoire de Géologie de l'Ecole Normale Supérieure qui correspond à une Unité Associée au CNRS. Le laboratoire regroupe 27 chercheurs et enseignants répartis en quatre 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. Celle-ci comprend sept chercheurs. 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.

1. Principaux thèmes de recherche et résultats acquis

(a) Etude de la Subduction

Les principaux résultats de la campagne Kaiko-Nankai sur le rôle des fluides dans les zones de subduction ont été présentés à un Colloque International à Paris les 5-6 Novembre 1991 et dans un Colloque de la Royal Society à Londres les 7-8-9 Novembre 1991. Ces résultats sont présentés dans les dernières leçons de l'année (voir plus haut). Ils sont en cours d'impression.

L'effort principal en ce domaine reste la quantification de la circulation des fluides et sa modélisation. Dans ce but, on continue un large effort de coopération national et international dans lequel la mesure à long terme des profils verticaux de température dans les sédiments des prismes forme une part importante. L'exploration se concentre sur le prisme de Kaiko-Nankai, où des plongées auront lieu en 1991 avec le submersible japonais, le prisme de la Barbade (campagne Manon en février 1991) et la Ride Méditerranéenne au large de la Crète.

(b) Ouverture de la Mer de Chine et évolution géodynamique tertiaire du Viet-Nam du Sud

Un nouveau programme est mis en place pour comprendre dans quelle mesure le soulèvement Mio-Pliocène du Viet-Nam Sud et les grands épanchements basaltiques qui l'accompagnent est lié à l'ouverture de la mer de Chine. Une mission de terrain au Viet-Nam Sud en Novembre 1990 a ouvert la voie à un programme géologique à terre en collaboration avec l'Université d'Hanoï. Une campagne océanographique sur la marge continentale du Viet-Nam est envisagée pour l'année 1993. Enfin, un examen d'ensemble des conséquences de la cinématique de la collision de l'Inde avec l'Asie sur l'évolution du Sud Est de l'Asie a été fait et sera soumis à publication dans le courant de l'année.

ACTIVITÉS DIVERSES

Xavier Le Pichon a donné les conférences suivantes :

- 5 Juillet 1990, à Strasbourg au Colloque « Terre, notre Planète »
- 10 Juillet, Sophia Antipolis
- 5 novembre, Colloque « Fluids in Subduction Zones », à Paris
- 8 Novembre, Colloque Royal Society, à Londres
- 14 Novembre, à Cherbourg
- 20 Novembre, Université d'Hanoï
- 6 Mai, Atelier ESF-CEE sur la Recherche en Géologie Marine à Kiel
- 17 Mai, Université d'Utrecht
- 28-29 Mai, American Geophysical Union à Baltimore, USA

Du 16 Novembre au 4 Décembre, il a effectué une mission de terrain au Viet-Nam.

Il a été nommé Président du Comité Scientifique d'Ifremer.

Il a été nommé pour un second terme au Comité des Grands Investissements auprès du Ministre de la Recherche.

Il a reçu la Médaille Wollaston de la Société Géologique de Londres.

PUBLICATIONS

1990

Equipe de Géodynamique

AUZENDE J.-M., HONZA E., BESPFLUG X., DEO S., EISSEN J.-P., HASHIMOTO J., HUCHON P. et al. *Active Spreading and Hydrothermalism in North Fiji Basin (SW Pacific). Results of Japanese French Cruise Kaiyo 87. (Marine Geophys. Res., 12, 269-283, 1990).*

BOURGOIS J., HUCHON Ph., PAUTOT G., *Tectonics of the Peru active margin. (In Tectonics of Circum-Pacific Continental margins, Aubouin & Bourgeois eds., VSP, 77-137, 1990).*

DE VOOGD B., KEEN C.E., KAY W.A., *Fault reactivation during Mesozoic extension in eastern offshore Canada. (Tectonophysics, 173, 567-580, 1990).*

FOUCHER J.-P., LE PICHON X., LALLEMANT S., HOBART M.A., HENRY P., BENEDETTI M., WESTBROOK G.K., LANGSETH M.G., *Heat flow, tectonics and fluid circulation at the toe of the Barbados accretionary prism. (J. Geophys. Res., 95, 8859-8867, 1990).*

GAUTIER P., BALLEVRE M., BRUN J.-P., JOLIVET L., *Extension ductile et bassins sédimentaires mio-pliocènes dans les Cyclades (îles de Naxos et Paros). (C.R. Acad. Sci. Paris, 147-153, 1990).*

HENRY P., LE PICHON X., LALLEMANT S., FOUCHER J.-P., *Mud volcano field seaward of the Barbados accretionary complex, a deep-towed side-scan sonar and submersible survey. (J. Geophys. Res., 95, 8917-8929, 1990).*

HUCHON Ph., BOURGOIS J., *Subduction-Induced Fragmentation of the Nazca Plate off Peru : Mendana Fracture Zone and Trujillo Trough Revisited. (J. Geophys. Res., 8419-8436, 1990).*

JOLIVET L., DAVY Ph., COBBOLD P., *Right-Lateral shear along the Northwest Pacific margin and the India-Eurasia collision. (Tectonics, 9, 1409-1419, 1990).*

JOLIVET L., DUBOIS R., GOFFE B., MICHARD A., JOURDAN C., FOURNIER M., *Ductile extension in alpine Corsica. (Geology, 18, 1007-1010, 1990).*

LAFOY Y., AUZENDE J.-M., RUELLAN E., HUCHON P., HONZA E., *The 16 40'S Triple Junction in the North Fiji Basin (SW Pacific). (Marine Geophys. Res., 12, 285-296, 1990).*

LALLEMANT S., HENRY P., LE PICHON X., FOUCHER J.-P., *Detailed structure and possible fluid paths at the toe of the Barbados accretionary wedge (ODP Leg 110 area) : Results of a deep-tow side-scan sonar survey. (Geology, 854-857, 1990).*

LE PICHON X., HENRY P., LALLEMANT S., *Water flow in the Barbados accretionary complex. (J. Geophys. Res., 95, 8945-8967, 1990).*

LE PICHON X., FOUCHER J.-P., BOULÈGUE J., HENRY P., LALLEMANT S., BENEDETTI M., AVEDIK F., MARIOTTI A., *Mud volcano field seaward of the Barbados accretionary complex, a submersible survey. (J. Geophys. Res., 95, 8931-8943, 1990).*

LEG 127 Shipboard Scientific Party dont JOLIVET L., *Les premiers forages de la croûte océanique de la mer du Japon ; résultats préliminaires du leg ODP 127. (C.R. Acad. Sci. Paris, 311, 837-844, 1990).*

RANGIN C., JOLIVET L., PUBELLIER M. & THE TETHYS PACIFIC WORKING GROUP, *A simple model for the tectonic evolution of southeast Asia and Indonesia region for the past 43 m.y. (Bull. Soc. Geol. Fr., 6, 889-905, 1990).*

RANGIN C., PUBELLIER M., AZEMA J., BRIAIS A., CHOTIN P., FONTAINE H., HUCHON Ph., JOLIVET L. et al., *The quest for Tethys in the Western Pacific. 8 paleogeodynamic maps for Cenozoic time. (Bull. Soc. Géol. Fr., 6, 907-913, 1990).*

SEGURET S., HUCHON Ph., *Trigonometric Kriging : a new method for removing the diurnal variation from geomagnetic data. (J. Geophys. Res., 95, 21.383-21.397, 1990).*