

Géodynamique

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

COURS : L'amincissement de la croûte continentale

Le cours de l'année 1988-89 a été consacré à l'amincissement de la croûte continentale. Le problème principal abordé par le cours était celui de l'amincissement extrême par un facteur supérieur à cinq, tel qu'il est observé au pied des marges continentales. Cet amincissement est-il dû dans sa totalité à l'extension ? Et l'extension superficielle observée est-elle représentative de l'extension moyenne ?

On n'a pas cherché à être exhaustif dans ce domaine immense où un consensus est loin d'être acquis. L'approche suivie consistait à caractériser et évaluer l'importance des différents processus, à partir de l'étude des zones en extension actives telles que la province Basin and Range à l'Ouest des Etats-Unis, l'Egée, le Golfe de Suez et le Nord de la Mer Rouge.

Après un historique rapide des idées sur l'extension, on étudiait d'abord l'extension dans la croûte supérieure cassante à partir de la sismicité, examinant la validité du modèle de fracture de Coulomb généralement admis. Ceci a conduit à mettre sérieusement en doute l'applicabilité du modèle de Coulomb en dessous de 4 à 5 km de profondeur. On examinait ensuite les méthodes de mesure de l'extension dans la croûte supérieure cassante, montrant que le résultat dépend du modèle mécanique adopté. Le choix souvent fait d'un cisaillement simple vertical n'est pas justifié et conduit à très largement sous-estimer la valeur de l'extension.

On a alors abordé le problème du réajustement isostatique en fonction des propriétés élastiques de la couche supérieure. Les données sismologiques suggèrent une très faible épaisseur élastique ce qui conduit à admettre un effet de réajustement isostatique important, même pour de petits blocs (10 à 20 km). On montre que ce modèle rend bien compte de la déformation observée en bas de marge.

On aborde alors le rôle respectif de la croûte inférieure, mécaniquement peu résistante et du manteau supérieur théoriquement beaucoup plus résistant. Il apparaît clairement que la croûte inférieure joue le rôle de zone de découplage mécanique entre croûte supérieure et croûte inférieure, mais la résistance de la croûte supérieure cassante est sans doute très surestimée et celle du manteau supérieur très mal connue et vraisemblablement également surestimée. On indique brièvement qu'au-delà de taux d'extension supérieurs à 2, la fusion partielle joue un rôle considérable et doit profondément modifier l'évolution mécanique du système.

Enfin, on discute l'évolution du Golfe de Suez et de la Mer Rouge pour montrer que le soulèvement très important des épaules observé sur leurs bordures s'explique simplement par couplage mécanique entre l'intrusion mantélique axiale et les noyaux élastiques des plaques adjacentes.

Les notes de cours ont été distribuées aux participants.

1 - La croûte supérieure cassante et le modèle de fracture de Coulomb

L'extension active observée dans la province de Basin and Range (entre la Sierra Nevada et le plateau du Colorado), en Egée, dans le Golfe de Suez et dans le Nord de la Mer Rouge affecte une croûte continentale dans laquelle le taux d'étirement moyen reste compris entre 0.6 et $2.0 \times 10^{-15} s^{-1}$. Le taux d'étirement ne montre pas de variation claire avec la largeur de la zone d'extension alors qu'inversement la vitesse d'étirement est d'autant plus importante que cette largeur est grande. Ceci suggère que le taux d'étirement est le facteur qui contrôle l'extension.

L'extension dans la croûte supérieure, telle qu'elle s'exprime dans les séismes se distribue sur un réseau de failles planes faisant typiquement un angle de 40 à 50° avec l'horizontale. Les séismes principaux se situent à la base de la zone des répliques principalement entre 5 et 15 km de profondeur, en moyenne vers 8 km. La jonction avec la zone inférieure asismique semble se faire grâce à des failles presque horizontales n'ayant de comportement cassant qu'à très haut taux de déformation. Dans au moins un cas, celui du séisme de Corinthe en 1981, deux failles normales conjuguées ont joué simultanément. Elles sont toutes deux planes et ont un pendage voisin de 45°.

La plupart des travaux effectués sur la croûte cassante ont admis jusqu'à présent que le comportement est gouverné par la loi de fracture de Coulomb

$$T = C_i + \mu_i N$$

où T est la contrainte tangentielle et N la contrainte normale au plan de cassure,

C_i est la force de cohésion interne et $\mu_i = \tan \phi_i$, le coefficient de friction interne

Les expériences en laboratoire de Byerlee ont montré que

$$T = 0.85 N, \text{ pour } N < 200 \text{ MPa}$$

$$\text{et } T = 50 + 0.65 N$$

$$\text{pour } 200 < N < 1700 \text{ MPa}$$

Ce résultat n'est pas modifié de manière significative par l'augmentation de la température tant que celle-ci reste inférieure à 400-500 °C. Il ne dépend pas du type de roche sauf pour certaines argiles pour lesquelles μ est beaucoup plus faible. En conséquence, on admet généralement

$$T = 0.85 \text{ à } 0.75 N$$

dans les dix premiers kilomètres correspondant à la croûte cassante. Ceci conduit à admettre que la résistance mécanique de la croûte cassante augmente linéairement avec la contrainte normale, et donc en pratique avec la profondeur. Le maximum de résistance mécanique se trouve à la base de la croûte cassante et est très élevé.

Si les observations sur les angles de fracture faites en surface confirment la validité de la loi de Byerlee et si les mesures faites en forage jusqu'à 4 à 5 km de profondeur semblent en général compatibles avec cette loi, les données sismologiques interprétées en terme de loi de Coulomb, indiquent un coefficient de frottement très faible dans la partie principale de la croûte cassante. L'absence de courbure des failles est difficile à réconcilier avec une augmentation rapide du coefficient de frottement vers la surface. Par ailleurs, puisque l'extension amène une rotation progressive des blocs limités par les failles, et donc des failles elles-mêmes, cette rotation n'est pas compatible avec une cohésion interne C_i nulle ni avec des coefficients de friction μ_i élevés.

En conclusion, la loi de Byerlee couramment utilisée ne peut être utilisée pour expliquer le comportement mécanique de la croûte cassante. Comme le notent Carter et Tsenn, elle donne la valeur maximale possible de cette résistance dans la partie supérieure. En dessous de 5 km, la résistance à la friction décroît rapidement et non linéairement, sans doute à cause des processus de solution-diffusion amorçant une transition vers les processus de fluage par dislocation caractéristiques des températures supérieures à la moitié de la température de fusion. En conséquence, il est probable que la contrainte cisailante maximale dans la croûte ne dépasse guère 50 MPa alors que le modèle classique prédit un maximum pouvant atteindre 500 à 700 MPa. Il faut d'ailleurs noter que les résultats récents obtenus sur la faille de San Andreas semblent également indiquer que le coefficient de friction moyen le long de cette faille est très faible puisque la contrainte principale lui est approximativement perpendiculaire et que le flux de chaleur produit par le frottement supposé n'a pas été détecté.

2 - *La mesure de l'extension superficielle : problème du modèle mécanique*

On affirme généralement que l'extension mesurée en surface est inférieure, voire très inférieure, au taux nécessaire pour expliquer l'amincissement observé de la croûte continentale ou celui qui serait nécessaire pour expliquer la subsidence observée. Cette affirmation s'appuie sur des reconstitutions pré-extension de la croûte superficielle. Ces reconstitutions sont faites en établissant des coupes dites « équilibrées » pour lesquelles on admet que la surface est conservée durant l'extension.

En fait, dès que l'extension est significative, la déformation qu'elle implique est importante et l'établissement de la coupe dépend du modèle mécanique choisi. En général, on admet dans la littérature, souvent implicitement, que la déformation est une déformation semblable, produite par cisaillement simple vertical. On ne voit pas de justification mécanique pour l'existence d'un tel cisaillement : il paraît plus raisonnable d'admettre un cisaillement oblique dont la direction n'est d'ailleurs probablement pas constante. Alors l'extension correspondante peut-être deux à trois fois supérieure à celle qui est obtenue en admettant un cisaillement vertical.

Une telle interprétation conduit à admettre une surface de décollement à la base de la zone cassante nettement moins profonde que celle déterminée par l'approche classique. Ainsi, dans le cas du Golfe de Suez, le décollement se situerait vers 15 km et l'extension serait double de celle proposée jusqu'ici. Il y a alors accord entre l'extension mesurée et l'extension calculée.

3 - *Effet de l'élasticité de la croûte et du manteau supérieur durant l'extension*

Si la croûte supérieure et (ou) le manteau supérieur possèdent un paramètre flexural élastique non infini, l'amincissement de la croûte doit nécessairement amener un ajustement élastique dû à la force de rappel isostatique. La réponse élastique agit comme un filtre passe-bas où la longueur d'onde de coupure est d'environ 5 fois la valeur du paramètre élastique α . Dans la croûte supérieure, les blocs sont espacés de 10 à 20 km. Il y a réajustement élastique si α est inférieur ou égal à 2 à 4 km, ce qui est très faible. Il est clair alors que ceci ne peut se passer qu'au niveau de la croûte supérieure cassante et que la couche où se fait la compensation doit être la croûte inférieure. Au contraire, pour une marge continentale toute entière, de largeur de 100 à 150 km, l'effet sera important si α est inférieur ou égal à 20 à 30 km. C'est plutôt le manteau supérieur qui contrôle cette déformation.

L'étude récente faite par King et ses collaborateurs des déformations élastiques liées à de grandes failles sismiques indique que le paramètre élastique obtenu est très faible. On montre qu'avec un tel paramètre élastique les blocs basculés de bas de marge doivent subir un réajustement isostatique

élastique qui rend compte de manière correcte de leur déformation. Dans ce réajustement, il faut tenir compte du refroidissement préférentiel de la partie du bloc la plus amincie qui tend à lui ajouter une racine de croûte inférieure. Il n'y a pas alors conservation du volume.

En ce qui concerne l'effet élastique à l'échelle de la marge, on montre que, contrairement à ce qui est affirmé dans la littérature, il peut rendre compte des soulèvements bordiers de part et d'autre des zones de Rift du fait d'un couplage mécanique entre zone axiale et zone bordière. En effet, l'isostasie impose que la zone axiale corresponde à une zone de remontée du manteau amenant un cisaillement vertical. Le phénomène peut être décrit comme un poinçonnement du manteau asthénosphérique à l'intérieur de la lithosphère. En conséquence, la lithosphère élastique non amincie située de part et d'autre de ce poinçonnement subit donc une force cisailante agissant vers le haut, expliquant le soulèvement bordier.

Ce modèle est appliqué au Golfe de Suez et à la Mer Rouge. On montre que le cisaillement calculé avec une rhéologie de type olivine peut sans difficulté expliquer les soulèvements observés qui atteignent 1 000 à 2 000 mètres. On montre par ailleurs que les anomalies gravimétriques prédites par ce soulèvement sont effectivement observées. On conclue que le modèle de convection secondaire proposé par certains auteurs n'est pas compatible avec les données disponibles.

4 - *Les très grandes extensions et le rôle du magmatisme*

La fusion partielle ne peut évidemment plus être ignorée aux très grandes extensions. En fait, dès que le taux d'extension dépasse 2, le soulèvement correspondant de l'asthénosphère conduit à une fusion partielle significative. Pour un amincissement de l'ordre de 5, comparable à celui observé en bas de marge, le taux de fusion prédit est de l'ordre de 10 % et l'épaisseur équivalente de basalte produite est de 2 km. Le problème alors est celui de la migration de la phase liquide et de son piégeage. Peut-on encore parler de croûte continentale amincie dans ce cas ? Ne s'agit-il pas plutôt d'une croûte mixte sur un manteau nouvellement mis en place ?

En conclusion, certains problèmes majeurs restent non résolus. En particulier, on ne connaît ni le mode de déformation de la partie mantélique de la lithosphère aux très grands étirements ni le rôle qu'y joue la phase basaltique liquide.

X. L.P.

SÉMINAIRES (Janvier-Mars 1989)

- 11 Janvier : Extension égéenne, avec J. Mercier.
18 Janvier : Extension dans le Golfe de Suez, avec B. Colletta.
25 Janvier : Implications des profils sismiques sur les mécanismes d'amincissement, avec S. Klemperer.
1^{er} février : Extension dans le Golfe de Lion, avec J. Burrus.
8 Février : Failles plates et extension, avec J.P. Brun.
15 Février : Géodynamique de l'extension : modélisation numérique avec J.P. Vilotte et M. Daignières.
1^{er} Mars : Géodynamique de l'extension : modélisation analogique, avec J.P. Brun.
15 Mars : Tectonique extensionnelle dans les chaînes, avec M. Mattauer et J. Malavieille.
22 Mars : Géodynamique des Rifts : les causes, avec C. Froidevaux.

ACTIVITÉS SCIENTIFIQUES de juin 1988 à mai 1989

Xavier Le Pichon dirige le Département de Géologie de l'Ecole Normale Supérieure qui correspond à une unité associée au CNRS. Le département regroupe 24 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. Celle-ci comprend neuf chercheurs. Seules certaines des activités plus directement liées au travail de X. 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

L'exploitation du programme franco-japonais Kaiko s'est poursuivie au niveau des publications mais surtout les données obtenues durant les campagnes Ensbart et Baresnaut en 1987 au large de La Barbade ont été dépouillées et analysées pour mieux déterminer le rôle joué pour les fluides dans les zones de subduction.

Les résultats principaux concernent :

— La découverte d'un champ de volcans de boue actifs par 5000 mètres de profondeur, au large du prisme d'accrétion de La Barbade. L'étude par submersible d'un de ceux-ci montre qu'il s'agit d'un lac de boue chaude, à l'origine de sorties de fluide volumétriquement importantes et chargées de méthane.

— La découverte de zones de flux de chaleur anormalement élevé associées à des miniprismes d'accrétion, à l'intersection des chevauchements principaux avec la surface.

— La modélisation d'ensemble des écoulements solide et fluide dans le prisme qui permet de mettre en évidence le rôle des migrations latérales de fluide sur de très grandes distances et l'aspect transitoire de certains des écoulements. Quatre articles présentant ces résultats et interprétations ont été soumis à Journal of Geophysical Research.

(b) Etude sismique de la croûte de Méditerranée orientale

Une campagne à deux bateaux a permis d'effectuer une série de 12 profils de sismique réflexion oblique-sismique réfraction (ESP) en Méditerranée orientale en novembre et décembre derniers. Les chefs de mission étaient P. Huchon et S. Lallemand. Les résultats sont en cours de dépouillement mais permettent dès à présent d'affirmer que la croûte est océanique et que la ride méditerranéenne a une structure compatible avec celle d'un prisme d'accrétion. Les résultats préliminaires ont été présentés dans plusieurs congrès internationaux.

ACTIVITÉS DIVERSES

X. Le Pichon a participé à l'organisation d'un colloque NATO sur le rôle des fluides dans les zones de subduction qui s'est tenu près de Pise (Italie) du 18 au 23 Septembre 1988.

Il a donné des conférences dans les colloques scientifiques suivants :

— à Thessalonique pour le colloque concernant la fondation du laboratoire sismologique, du 1^{er} au 4 Juillet 1988

— à Paris, pour le Colloque sur la Tectonique des Marges de l'Asie de l'Est, le 14 septembre 1988

— à Nice, pour le Colloque de l'American Petroleum Geology Society sur la Méditerranée, le 25 Septembre 1988

— à Paris, pour le colloque sur le 20^e anniversaire de la Tectonique des Plaques, le 18-20 Novembre 1988

— à Paris, pour le Colloque sur le Tour du Monde du Jean Charcot, le 2 Mars 1989

— à Baltimore, pour la réunion annuelle de l'American Geophysical Union, du 7 au 11 Mai 1989.

Il a été nommé membre du Comité des Grands Investissements et du Comité de Pilotage des grands Colloques Scientifiques au Ministère de la Recherche et à participé à l'audit de la participation de la Fondation Européenne de la Science au Programme de Forage océanique ODP.

L'Université Dalhousie de Halifax (Canada) l'a nommé Dr. Honoris Causa.

PUBLICATIONS

Equipe Géodynamique

1988

AIFA T., FEINBERG H., POZZI J.P., *Pliocene-Pleistocene evolution of the Tyrrhenian arc : paleomagnetic determination of Uplift and rotational deformation.* (*Earth Planet. Sc. Lett.*, 87, 438-452).

AUZENDE J.M., HONZA E., BOESPFLUG X., DEO S., EISSEN J.P., HASHIMOTO J., HUCHON P., ISHIBASHI J., IWABUCHI Y., JARVIS P., JOSHIMA M., KAWAMICHI Y., KAWANA I., KIZIMOTO K., KUWAHARA Y., LAFOY Y., MATSUMOTO T., MAZE J.P., MIYANABE R., NOMMA H., NAGANUMA T., NOJIRI Y., *L'accrétion récente dans le bassin Nord-Fidjien : premiers résultats de la campagne franco-japonaise KAIYO 87.* (*C.R. Acad. Sc. Paris*, 306, 971-978).

BOURGOIS J., PAUTOT G., BANDY W., BOINET T., CHOTIN P., HUCHON P., MERCIER DE LEPINAY B., MONGE F., MONLAU J., PELLETIER B., SOSSON M., VON HUENE R., *Seabeam and seismic reflection imaging of the tectonic regime of the Andean continental margin off Peru (4S to 10S).* (*Earth Planet. Sc. Lett.*, 87, 111-126).

BOURGOIS J., VON HUENE R., PAUTOT G., HUCHON P., *Jean Charcot Seabeam survey along ODP Leg 112 northern transect, in Proc. ODP, Init. Repts (Pt.A)*, E. Suess, Von Huene, R. et al., 112, 131-137.

GAULIER J.M., LE PICHON X., LYBERIS N., AVEDIK F., GELI L., MORETTI I., DESCHAMPS A., HAFEZ S. *Seismic study of the crust of the Northern Red Sea and Gulf of Suez.* (*Tectonophysics* 153 (1-4), 55-88).

JOLIVET L., CADET J.P., LALEVEE F. *Tectonic evolution of northeast Asia and the collision of the Okhotsk microcontinent.* (*Tectonophysics* 149, 89-109).

LE PICHON X., BERGERAT F., ROULET M.J. *Plate kinematics and Tectonics leading to the Alpine belt formation : a new analysis.* (John Rodgers symposium Yale, Février 1985. Geological Society of America. Special Paper 218, 111-131).

LE PICHON X., GAULIER J.M. *The rotation of Arabia and the Levant fault system.* (*Tectonophysics* 153, 271-294).

LEGROS V., SUON C., POZZI J.P., BERTHAUD P., LIOT F., *Magnétographie ; résultats obtenus à l'hôpital Ambroise Paré (Boulogne).* (*Rev. Clinique des maladies Respiratoires* 5, 601-610).

POZZI J.P., MARTIN J.P., POCACHARD J., FEINBERG H., GALDEANO A. *In-situ magnetostratigraphy : interpretation of magnetic logging in sediments.* (*Earth Planet. Sc. Lett.*, 88, 357-373).

STECKLER M.S., BERTHELOT F., LYBERIS N., LE PICHON X., *Subsidence in the Gulf of Suez : implications for rifting and plate kinematics.* (*Tectonophysics* 153, 249-270).

THOMAS V., POZZI J.P., NICOLAS A. *Paleomagnetic results from Oman ophiolites related to their emplacement.* (*Tectonophysics*, 151, 297-321).

VILA J.M., PUBELLIER M., JEAN-POIX C., FEINBERG H., BUTTERLIN J., BOISSON D., AMILCAR H., AMILCAR H.C., *Définition de la limite entre les blocs méridional et septentrional d'Hispaniola : découverte d'un terrain de la nappe de Macaya dans l'anticlinal de Pierre Payen (centre d'Haiti, chaîne des Matheux, Grandes Antilles) ; implications géodynamiques.* (*C.R. Acad. Sc. Paris*, 307, série II, 603-608).