

Géodynamique

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

COURS : Mouvements gravitaires crustaux

Je me suis intéressé dans mon cours au comportement rhéologique de l'ensemble de la croûte continentale au sein de la lithosphère lorsqu'elle est soumise à la déformation. Mécaniquement, nous avons affaire à un milieu très hétérogène du fait des variations de composition chimique et de l'augmentation de la température avec la profondeur. Du fait de la grande différence de densité (au moins 500 kg/m^3) entre la croûte et le manteau, les fortes variations d'épaisseur de croûte conduisent à des variations rapides des forces de volume. La question qui sous-tendait l'ensemble du cours était d'essayer de comprendre comment réagissent la lithosphère et plus particulièrement la croûte mécaniquement hétérogènes sous l'action des variations de force de volume en présence de forces appliquées aux frontières et (ou) à la base de la plaque lithosphérique. En effet, les forces appliquées à leurs frontières par deux plaques continentales en convergence emmagasinent de l'énergie gravitationnelle potentielle sous forme de topographie de la surface et de la racine crustale. Elles créent donc des variations très rapides des forces de volume. Un point fondamental est de découvrir si cette hétérogénéité est suffisante pour introduire un ou des niveaux de découplage mécanique à l'intérieur de la lithosphère et plus particulièrement de la croûte susceptibles de jouer sous l'action des forces gravitaires accumulées.

On peut reformuler la question sur le plan rhéologique de la manière suivante : où et dans quelles circonstances y a-t-il au moins un niveau dans la lithosphère dont la viscosité équivalente est suffisamment basse ($\leq 10^{19} \text{ Pa.s}$) pour que ce niveau découple la base de la lithosphère de son sommet ? Je me suis attaché plus particulièrement à l'ensemble Tibet-Himalaya qui inclut à lui seul 82 % de la surface du globe à plus de 4 km d'altitude, soit une surface totale d'environ 4 millions de km^2 . Le Tibet est bien l'endroit au monde où l'on s'attend à l'existence d'un tel découplage. J'ai donc essayé d'évaluer de manière critique

ce que la cinématique et la géophysique nous apprennent sur l'existence possible de ce niveau de découplage au Tibet.

La découverte que des niveaux de décollement existent à l'échelle régionale à l'intérieur des orogènes n'est pas neuve. L'utilisation de la sismique réflexion amena dans les années 1980 à découvrir que les systèmes chevauchants à l'avant des chaînes sont généralement détachés sur un grand décollement sous lequel le socle est non déformé. La quantité de raccourcissement est telle qu'elle conduit à étendre ce décollement sous les zones internes. Il fallait donc admettre que l'orogène tout entier « flotte » sur la lithosphère. Il apparut très vite que ceci s'appliquait de la même manière à la subduction où la notion de décollement est essentielle. Nous avons longuement discuté cette question dans nos cours antérieurs, aussi bien pour la subduction que pour la subduction-collision. Le problème qui nous intéressait dans le cours est celui de la déformation interne à la plaque chevauchante qui provoque cette accumulation d'énergie potentielle par épaissement de la croûte continentale.

Les séminaires ont été choisis de manière à présenter une vision d'ensemble des interprétations actuelles en termes de niveaux de décollement et plus particulièrement d'écoulement chenalisé. Pour ma part, je me suis plutôt attaché à examiner les données qui permettent de valider ou de mettre en doute les bases physiques de ces modèles. J'ai en particulier examiné la cinématique actuelle pour la comparer aux indications d'écoulement dans le manteau. J'ai ensuite examiné ce que l'on peut dire des propriétés élastiques de la lithosphère et du lien avec la ou les zones sismogéniques. Avec l'aide des investigations sismologiques et électriques, ceci nous a permis d'examiner les variations de la stratification rhéologique dans ces zones.

En commençant la préparation de ce cours, je m'attendais à ce qu'un consensus se soit établi sur le mode de déformation de l'ensemble Himalaya-Tibet. Je me suis aperçu qu'il n'en était rien. En dépit des énormes progrès dans l'acquisition des données, on retrouve aujourd'hui les mêmes écoles d'interprétation incompatibles entre elles depuis plus de quinze ans : on peut citer au moins : celle qui privilégie le rôle des grandes failles lithosphériques, celle qui s'attache à une description cinématique en termes de blocs rigides et élastiques de taille moyenne et met l'essentiel de la résistance dans la croûte supérieure cassante, celle qui privilégie une lithosphère déformable homogène, celle qui introduit au moins un niveau majeur de découplage dans la croûte inférieure, celle au contraire qui considère que la croûte inférieure est plus résistante que le manteau sous-jacent. J'ai essayé de comprendre les raisons qui conduisent ces chercheurs souvent éminents à privilégier tel ou tel aspect dans leurs interprétations.

J'ai conclu mon cours en considérant qu'il y avait aujourd'hui la preuve qu'un écoulement crustal et mantellique se produit vers l'est au nord de la suture de Bangong et à l'est de 85 °E.

Il est possible que s'y ajoute un écoulement chenalisé de la croûte intermédiaire mais son ampleur est sans doute beaucoup plus modeste que celle proposée dans la plupart des modèles de ce type. En ce qui concerne l'écoulement vers le sud de la Great Himalayan Sequence, le modèle mis en avant par ses défenseurs à l'heure actuelle (celui du groupe Beaumont) ne m'a pas convaincu car il présente trop d'incompatibilités avec des observations fiables et trop d'approximations. Je me demandais en fin de compte si la position prise par McKenzie et Jackson en 2002 en ce qui concerne le flux chenalisé n'est pas la plus réaliste. Il ne s'agirait pas d'un flux permanent mais d'un flux transitoire lié à l'apparition d'un taux de fusion partielle suffisant dans la croûte, flux qui cesserait en quelques millions d'années. La question en tout cas me paraît rester très ouverte.

Les notes de cours détaillées, les figures avec leurs légendes et les références sont disponibles sur le site Internet du Collège de France. On peut y avoir accès facilement en utilisant un moteur de recherche avec les mots clefs « cours de géodynamique ».

SÉMINAIRES À PARIS (janvier-février 2007)

MOUVEMENTS GRAVITAIRES CRUSTAUX

10 janvier : « **Channel Flow, ductile extrusion of the Middle Crust and exhumation processes in the Himalaya and south Tibet** », M.P. SEARLE, Université d'Oxford.

17 janvier : « **Glissements gravitaires superficiels et flux crustal associé : exemples de la Birmanie et du Golfe du Mexique** », Claude RANGIN, Aix-en-Provence.

24 janvier : « **Observation et modélisation de la dynamique des haut-plateaux (Andes centrales, Anatolie, Tibet) : implications sur le comportement mécanique de la lithosphère** », Joseph MARTINOD, Toulouse.

31 janvier : « **The Geologic Expression of Lower Crustal Flow (Mainly Tibetan)** », Leigh ROYDEN, MIT, Boston.

7 février : « **Contraintes sismologiques sur la structure et la déformation profondes sous le Tibet** », Barbara ROMANOWICZ, UC Berkeley.

14 février : « **Data on potential lower crustal flow in the Pamir-Tibet Plateau : connecting the pressure-temperature-time evolution of Tibetan crust with marginal Plateau growth** », Lothar RATSCHBACHER, Université de Freiberg.

COURS ET SÉMINAIRES À L'UNIVERSITÉ PAUL CÉZANNE À AIX-EN-PROVENCE

Les 14 et 15 juin 2007

TECTONIQUE RÉCENTE DE LA PROVENCE : RÔLE DES COUCHES DUCTILES

Colloque organisé par Xavier Le Pichon, Olivier Bellier et Claude Rangin avec l'aide de Nicolas Loget et Jing-Yi Lin.

— Xavier LE PICHON, « **Introduction : un bassin mésozoïque déstabilisé par la distension oligocène** ».

— Olivier BELLIER et Marc CUSHING, CNRS-Cérège et IRSN, « **Tectonique active de la Provence : état des lieux** ».

— Jean-Mathieu NOCQUET, CNRS-Géosciences Azur, « **État des connaissances géodésiques le long de la faille de la Durance et dans les Alpes du sud** ».

— Youri HAMON, IFP, « **Architecture 3-D des principaux réflecteurs sismiques dans la zone de la Moyenne Durance** ».

— Jing-Yi LIN, Collège de France, « **Relocalisation 3-D de ma microsismicité à partir du réseau sismique IRSN de la Faille de la Moyenne Durance** ».

— Xavier LE PICHON, « **Distension oligocène : chauffage du bassin et glissement gravitaire** ».

— Jean-Loup RUBINO, Total, Pau, « **Y a-t-il des manifestations diapiriques dans le Bassin Provençal ?** ».

— Laurent GUILLOU-FROTTIER, BRGM, Orléans, « **Flux de chaleur et températures profondes dans le bassin provençal** ».

— Bruno VENDEVILLE, Université de Lille 1, « **Déstabilisation des couches salifères sous un bassin ou une marge ; surcharge sédimentaire, glissement et étalement gravitaire** ».

— Michel SÉRANNE, Géosciences Montpellier, « **L'extension oligocène en Languedoc : un modèle de déformation de couverture** ».

— Claude RANGIN, Collège de France, « **Extension triasique et oligocène en Provence imagée par la sismique et géologie** ».

— Christian SUE, IUEM, Brest, « **L'extension dans les Alpes : implications géodynamiques** ».

— Fabrice HOLLENDER, CEA Cadarache, « **Synthèse de l'atelier Imagerie profonde de la Moyenne Durance et Perspective** ».

— Xavier LE PICHON, « **Discussion générale et conclusions** ».

Activités scientifiques de juin 2006 à juin 2007

Xavier Le Pichon qui avait dirigé jusqu'au 31 décembre 1999 le Laboratoire de Géologie de l'École normale supérieure, une unité associée au CNRS, ayant accompli 12 années de direction, avait laissé la place de directeur au Professeur Raul Madariaga. Au 1^{er} juillet 2003, il s'est délocalisé près du laboratoire du Cérège sur l'Europôle de l'Arbois, près d'Aix-en-Provence, dans des locaux fournis par l'université Paul Cézanne d'Aix-Marseille, pour que l'équipe de recherche de sa chaire de Géodynamique forme avec l'équipe de recherche de la chaire d'Évolution du Climat et de l'Océan d'Édouard Bard une antenne du Collège de France accueillie par l'université Paul Cézanne. L'équipe de géodynamique comprend cette année treize personnes : trois chercheurs permanents, trois post-doctorants, trois chercheurs en cours de thèse, un ingénieur informatique et

un agent technique permanents, un agent technique sous contrat temporaire. Le 16 septembre 2005 le nouveau bâtiment dit « Trocadéro » mis à la disposition de l'antenne du Collège de France par l'Europôle de l'Arbois a été inauguré, ce qui permet une interaction plus étroite avec le laboratoire d'Édouard Bard. Notre équipe de recherche a un accord-cadre avec la compagnie pétrolière Total pour profiter des synergies dans nos intérêts de recherche.

L'intérêt de l'équipe repose sur la relation entre les processus de déformation superficielle et les processus profonds en mettant l'accent sur l'importance des forces de gravité et sur le rôle des fluides. La connaissance du contexte géodynamique et tectonique est utile à la recherche pétrolière et c'est sur cette base qu'une collaboration scientifique avec l'industrie pétrolière a pu être développée.

L'originalité de notre équipe tient à la coopération étroite avec l'industrie qui se traduit dans le financement de thèses, de post-doctorants et de recherches, toutes les recherches conduisant à des publications. L'axe principal de nos recherches est l'étude géodynamique de zones tectoniquement actives menées avec la collaboration de grands organismes de recherche publics et industriels (CEA, Total) et de PME locales (SOACSY, EOSYS). Cet axe est sous la responsabilité de Claude Rangin. Un second axe est lié à la technologie sous-marine avec en particulier une participation aux efforts internationaux pour implanter des observatoires sous-marins sur les marges continentales. Cet axe est sous la responsabilité de Pierre Henry.

L'étude géodynamique de zones tectoniquement actives en collaboration avec l'Industrie s'appuie sur un accord-cadre avec la compagnie Total, un contrat de recherche avec le CEA, et des contrats ponctuels avec les PME locales. Avec Total, les projets sont centrés sur la déformation des réservoirs dans le bassin du Bengale et le Golfe du Mexique en privilégiant les relations entre déformation crustale et glissements superficiels dans leur cadre géodynamique global. Deux sur les trois thèses sous contrat engagées sur ce thème seront défendues à l'automne. Avec le CEA et en collaboration avec Total, nous étudions la part de la tectonique gravitaire dans la tectonique active de la Provence en testant un modèle de glissement en masse sur des couches sédimentaires ductiles. L'analyse de profils sismiques et leur vérité terrain est privilégiée. Mais grâce à l'IRSN, nous avons pu disposer des données du réseau sismique de la Moyenne Durance, ce qui nous permet de relocaliser la microsismicité de cette région prise en compte dans la détermination du risque sismique pour la centrale de Cadarache et le nouveau projet ITER. Ce travail a été présenté lors du colloque organisé en juin 2007 à Aix-en-Provence (voir plus haut). Il fera l'objet d'un numéro spécial de la Société Géologique de France.

L'objectif principal de la participation de l'équipe aux projets d'observatoire sous-marin est la compréhension du couplage fluide-mécanique dans les zones de faille et sous les pentes sous-marines instables. Les principaux chantiers sont l'étude de la zone sismogène sur la marge de subduction japonaise dans le cadre

du programme de forage IODP, la surveillance de la faille Nord Anatolienne en Mer de Marmara et le volet puits instrumentés de l'observatoire en Mer Ligure, conçu en collaboration avec Géosciences Azur et l'Ifremer. Une campagne effectuée avec le navire Atalante et le submersible Nautile d'Ifremer en mer de Marmara a eu lieu en mai et juin 2007 sous la direction de Pierre Henry pour étudier les sorties de fluide le long de la Faille Nord Anatolienne et leur lien possible avec l'activité sismique. Les chantiers Marmara et Ligure entrent dans le cadre du réseau d'excellence Européen Esonet. Le début des opérations de forage IODP avec le navire Japonais Chikyu est prévu fin 2007 sur Nankai (projet Nantroseize). Ces trois projets sont des projets à long terme.

Un effort considérable continue à se porter sur la compréhension du contexte géodynamique du grand séisme de Sumatra du 26 décembre 2004 qui faisait l'objet du cours principal de Xavier Le Pichon l'année précédente. Une participation de Claude Rangin à la campagne de l'IFREMER « Sumatra Aftershocks » a permis de participer à une analyse fine de la déformation sur cette marge de subduction très particulière. Par ailleurs, Jing Yi Lin et Tanguy Maury ont repris la localisation des microséismes enregistrés durant la campagne. La tomographie sismique qui en résulte donne des résultats inattendus, résultats qui ont été présentés à un colloque sur la subduction à Montpellier et seront présentés à San Francisco à l'American Geophysical Union en décembre 2007.

Il faut enfin noter la publication en cours à la Société Géologique de France et à l'American Association of Petroleum Geologists d'un recueil de travaux concernant la partie occidentale du Golfe du Mexique. Ce recueil met à la disposition des chercheurs sous forme électronique et graphique les synthèses géodynamiques (données et interprétations) obtenues dans le cadre de notre collaboration avec TOTAL et PEMEX. Il est le fruit de la stratégie de recherche que nous avons adoptée dans notre programme de géodynamique des zones actives menées avec l'aide de l'industrie. Nous préparons maintenant un nouveau recueil sur nos programmes concernant la Marge du Golfe du Bengale.

ACTIVITÉS DIVERSES DE XAVIER LE PICHON

- 28 juin 2006 — Conférence sur la tectonique des plaques et ses implications pour la région à Barcelonette.
- Du 25 au 28 septembre 2006 — Participation et conférence à l'atelier « Imagerie profonde de la Moyenne Durance » au Centre CEA de Cadarache.
- Du 1^{er} au 3 octobre 2006 — Jury de thèse de Jing-Yi Lin à Brest. Conférence à l'école doctorale.
- 6 octobre 2006 — Conférence à Saint Vallier « La souffrance de la mort en héritage ».
- 23 octobre 2006 — Visite de travail à l'IRSN à Paris.

— 7 novembre 2006 — Conférence inaugurale de la session de l'Institut des Hautes Études de Défense Nationale à Aix-en-Provence : « La tectonique des plaques : réflexion sur certaines implications pour notre société ».

— Du 02 au 6 janvier 2007 : Conférence invitée en l'honneur du départ à la retraite du Pr Zvi Garfunkel : « The Collapse of the Alps as the cause of the tectonics of Provence » — Jérusalem (Israël).

— 13 mars 2007 : Participation au Jury du Prix Mondial Cino del Duca — Académie des Sciences — Paris.

— Du 17 au 18 mars 2007 : Participation en tant qu'organisateur et conférencier au colloque « Learning from the disabled » financé par la Fondation Templeton à l'Arche à Trosly-Breuil.

— Le 22 mars 2007 : Remise du Diplôme Honoris Causa à l'Université Notre Dame de la Paix de Namur (Belgique).

— 23 mars 2007 : Conférence à la journée d'inauguration de Géosciences Montpellier.

— Du 17 au 18 mars 2007 : Conférence invitée pour le soixantième anniversaire de la Société Géologique de Turquie — Ankara (Turquie).

— Du 19 au 24 avril 2007 : Participation à la Rencontre : « Science et Société » organisée par Michel Serres — Lausanne (Suisse).

— Du 8 au 10 juin 2007 : Participation à la Mission Marnaut pour une plongée sur le Nautile en mer de Marmara — Istanbul (Turquie).

PUBLICATIONS DE XAVIER LE PICHON
depuis juin 2006

Active margins, in The establishment of the outer limits of the continental shelf beyond 200 nautical miles — Its international circumstances and its scientific aspects — 153-165, figures on CD, editor : Ocean Policy Research Foundation, Tokyo, Japan, 2007.

Tectonique Tertiaire de la marge Occidentale du Golfe du Mexique, une introduction

Rangin Claude, **Le Pichon X.**, Martinez J., Mario Aranda, Andréani L., Le Roy, C., L. Husson, N. Flotté, Nguyen Ngoc Hai, and Lelong B. Bulletin de la Société Géologique de France, à l'impression.

The Rio Bravo Fault, a major late Eocene-Oligocene left-lateral shear zone

Nicolas Flotté, Juventino Martinez, Claude Rangin, Laurent Husson, Marc Tardy and **Xavier Le Pichon**, Bulletin de la Société Géologique de France, à l'impression.

Thermal regime of the NW shelf of the Gulf of Mexico. 1) Thermal and pressure fields

Laurent Husson, Pierre Henry, **Xavier Le Pichon**, Bulletin de la Société Géologique de France, à l'impression.

Thermal regime of the NW shelf of the Gulf of Mexico. 2) Heat Flow

Laurent Husson, **Xavier Le Pichon**, Pierre Henry, Nicolas Flotté, Claude Rangin, Bulletin de la Société Géologique de France, à l'impression.

Tertiary extension in the northern Gulf of Mexico : a new interpretation of multichannel seismic data

Rangin Claude, **Xavier Le Pichon**, Nicolas Flotté and Laurent Husson, Bulletin de la Société Géologique de France, à l'impression.

Neogene crustal shear zone along the western Gulf of Mexico margin and its implications for gravity sliding processes : Evidences from 2D and 3D multichannel seismic data

Charlotte Le Roy, Claude Rangin, **Xavier Le Pichon**, Mario Aranda-García, Hai Nguyen Thi Ngoc, Louis Andréani and Juventino Martínez-Reyes. Bulletin de la Société Géologique de France, à l'impression.

The Neogene Veracruz Fault : evidences for left-lateral slip along the Southern Mexico Block

Louis Andréani, Claude Rangin, Juventino Martinez-Reyes, Charlotte Le Roy, Maruio Arnda-Garcia, **Xavier Le Pichon** and Rolando Peterson-Rodriguez. Bulletin de la Société Géologique de France, à l'impression.

The Southern Mexico Block : Main boundaries and new estimation for its Quaternary motion

Louis Andréani, **Xavier Le Pichon**, Claude Rangin and Juventino Martinez-Reyes. Bulletin de la Société Géologique de France, à l'impression.

DISTINCTIONS

Xavier Le Pichon a reçu le diplôme de Dr Honoris Causa de l'Université Notre Dame de la Paix de Namur.

Il a été nommé officier dans l'ordre de la Légion d'honneur.