

Géodynamique

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

COURS : L'évolution dans le temps des grandes failles transformantes

L'année dernière, j'avais abandonné la zone sismogénique pour traiter de la cinématique globale à la lumière des résultats récents du GPS. Je suis revenu cette année à la zone sismogénique à partir de l'évolution dans le temps des grandes failles transformantes continentales, depuis leur naissance jusqu'à leur abandon. J'avais montré que le modèle qui semblait s'imposer pour la zone sismogénique était celui d'une zone à faible résistance mécanique dans une croûte supérieure forte. La résistance de la zone sismogénique semble contrôlée par un faible coefficient de friction ($\ll 0.2$) bien qu'il n'y ait pas unanimité sur ce point. Ces dernières années, ce modèle « faille faible-croûte forte » a été plutôt conforté par diverses études et il est en cours de test grâce à un observatoire en cours d'installation dans un forage sur la faille de San Andreas.

Si ce modèle est correct, la première question qui se pose est le lien entre la localisation de la faille et la formation de cette zone faible. Par ailleurs, si la zone sismogénique offre une résistance faible, la résistance principale opposée au glissement le long de la faille serait-elle alors située dans la portion ductile sous-jacente ? Enfin est-ce cette portion ductile qui contrôle l'abandon éventuel du tracé de la faille et sa migration dans une autre zone ?

Le modèle que je privilégie est celui de la zone de faille comme une zone tabulaire de glissement géométriquement continue. Cette évolution vers une zone tabulaire étroite de glissement unique peut être expliquée par un mécanisme de rétroaction positive associé à une rhéologie d'adoucissement (strain weakening) dans le cœur de la faille où se produit la localisation. Ce mécanisme attire l'évolution à long terme vers une régularisation progressive de la zone de glissement géométriquement continue. La phase initiale transitoire courte associée au durcissement crée des structures fractales à l'intérieur de plusieurs hiérarchies de bandes. Dans la phase suivante, si le taux de déformation est suffisamment grand par

rapport au taux de cicatrisation (healing), le processus dominant devient l'adoucissement dans le cœur tabulaire de la faille où se concentre la déformation. Ce cœur s'épaissit au cours du temps.

Dans cette série de cours, nous nous sommes intéressés plus spécialement à la Faille de San Andreas, car elle est probablement la plus étudiée au monde et son étude a profondément influencé les idées et théories que j'ai été amené à évoquer. Cette faille a par ailleurs l'avantage que son histoire cinématique est celle qui est la plus précisément contrainte en âge et géométrie par la cinématique océanique.

J'ai rappelé que l'évolution dans le temps de la faille de San Andreas est celle qui va d'un système transtensif occidental à un système transpressif oriental. La lithosphère est affectée par une évolution tectonique rapide. La lithosphère en bordure du Pacifique a été affectée avant le Miocène par la subduction de près de 10 000 km de lithosphère océanique. Elle a été ensuite affectée par une phase de transtension entraînant une forte distension largement distribuée de la marge à l'intérieur, même si certains blocs n'ont pas été touchés par cette distension. Elle a été ensuite mise en transpression.

Il s'agit donc d'un système de failles complexe avec migration importante au cours du temps. La portion active la plus ancienne est la portion ductile en Californie Centrale dont le rejet total est de 315 km et l'âge d'environ 10 Ma. Ceci a un avantage : des portions plus anciennes ont été érodées et leur cœur peut être étudié à l'affleurement.

Les notes de cours détaillées, les figures avec leurs légendes et les références sont disponibles sur le site 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 (février-mars 2005)

2 février : Celal Sengor, Collège de France : « L'évolution de la faille Nord-Anatolienne dans le cadre de la zone de cisaillement Nord-Anatolienne ».

9 février : Sylvie Schueller, Université du Maine, « Localisation de la déformation et fracturation décrochante : l'étude expérimentale et numérique sur des analogues de la lithosphère continentale en collision ».

16 février : Jean-Pierre Brun, Université de Rennes I, « Déformation distribuée et déformation localisée à l'échelle lithosphérique dans le Décrochement Sud-Armoricain ».

16 mars : Jean Chéry, Université de Montpellier, « Variations temporelles de l'activité tectonique des grandes failles continentales : exemples et explications mécaniques ».

23 mars : Claude Rangin, Collège de France, Aix-en-Provence, « La faille de Sagaing de la mer d'Andaman à l'Himalaya ».

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

Ouverture de la Méditerranée Occidentale et épisode messinien : implications pour la tectonique du sud de la France.

Colloque organisé avec G. Clauzon et Olivier Bellier du Cérège.

Mercredi 18 mai 2005

— Xavier Le Pichon, cours : Ouverture de la Méditerranée occidentale : implications de la cinématique océanique.

— Laurent Jolivet, Université Pierre Marie Curie : Contexte géodynamique de la crise messinienne.

— Jacques Deverchère, Université de Bretagne occidentale : Ouverture et structure de la Mer Ligurienne et des bassins occidentaux.

— Xavier Le Pichon, cours : La crise messinienne, quelques réflexions d'un naïf.

— Jean-Pierre Suc, UCBL, Lyon : Une vision intégrée de la crise de salinité messinienne.

— Paul-Louis Blanc, IRSN, Fontenay-aux-Roses : La crise de salinité messinienne : bilan hydrologique, modèle conceptuel, et cataclysme final.

— Paul Guennoc, BRGM, Orléans : Témoins et rôle de l'événement messinien dans l'évolution des marges occidentale et orientale de la Corse.

Jeudi 19 mai 2005

— Christian Gorini, USTL, Lille : La crise messinienne dans le Golfe du Lion : interactions entre l'érosion messinienne et la tectonique post-rift de la marge.

— Julien Gargani, université du Maine : L'incision du Rhône messinien : interprétation de la dynamique et des déformations couplées.

— Georges Clauzon (Cérège, Aix-en-Provence) : Les déformations tectoniques révélées par les niveaux repères de la crise de salinité messinienne.

— Xavier Le Pichon : Discussion à partir des présentations du colloque.

Activités scientifiques de juin 2004 à juin 2005

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 comprenait pour son début à Aix-en-Provence dix personnes : trois chercheurs permanents, trois post-doctorants, un ingénieur informatique et un agent technique permanents, deux agents techniques sous contrat temporaire. Elle s'installera à la fin du mois de juin 2005 dans un bâtiment mis à la disposition de l'antenne du Collège de France ce qui permettra une interaction plus étroite avec le laboratoire d'Édouard Bard. L'inauguration officielle du bâtiment aura lieu le 16 septembre 2005. Enfin, il faut signaler que notre laboratoire a signé pour cinq ans un accord cadre avec la compagnie pétrolière Total pour profiter des synergies dans nos intérêts de recherche.

Principaux thèmes de recherche

a) Étude de la déformation du Japon

Dans le cadre du programme de forage international IODP, Pierre Henry a participé activement à la préparation de ce qui devrait être le premier objectif du nouveau bateau foreur japonais, le Chikyu qui sera opérationnel en 2007. La campagne de forage intitulée Nantroseize a en particulier pour but d'établir de véritables observatoires géophysiques permanents pour mieux comprendre la zone sismogénique au contact du chevauchement principal et de plans de rupture secondaires (splay faults) dont le rôle reste très mal compris dans les très grands séismes de subduction.

b) Étude de la déformation de l'Égée

La déformation de l'Égée et de la ride méditerranéenne a fait l'objet d'une étude qui utilise en particulier les mesures géodésiques pour quantifier la distribution de la déformation actuelle. deux articles ont été publiés dans ce cadre. Une étude de la prolongation de la faille nord-anatolienne en Égée est en cours.

c) Déformation de l'Asie du Sud-Est et le grand séisme de Sumatra

La première phase de l'étude de la faille de Sagaing et de la tectonique récente du Myanmar dirigée par Claude Rangin et financée par la compagnie Total est achevée. Une seconde phase comprenant une nouvelle série de mesures GPS et des travaux de terrain supplémentaires a été entamée à la suite du grand séisme de Sumatra. Par ailleurs une campagne de dix jours en mer avec le navire Marion Dufresne a été menée en mai 2005 avec l'aide de la compagnie Total sur la prolongation nord de ce grand séisme pour évaluer l'importance des effets du tsunami sur les fonds sous-marins. Ce thème rejoint ainsi les thèmes sismogéniques poursuivis sur la marge du Japon et en mer de Marmara.

d) Cinématique active de la mer de Marmara et risque sismique

Cette étude se poursuit en collaboration avec le Pr Sengor et son équipe de l'Université Technique d'Istanbul. Profitant de son séjour en France comme

professeur dans la chaire internationale, une étude des profils sismiques pétroliers de la compagnie nationale turque a été entreprise et s'accompagnera de travaux de terrain. Un article de synthèse sur la Faille Nord Anatolienne a été publié sous la direction de Celal Sengor.

Pierre Henry a utilisé un transit du navire Marion Dufresne en mer de Marmara pour obtenir plusieurs carottages permettant d'étudier plus particulièrement les fluides liés à l'activité de la faille nord-anatolienne. Il prépare avec Tiphaine Zitter une campagne utilisant un submersible ou un engin submersible sur ce thème en mer de Marmara pour l'année 2006. Ils ont présenté une modélisation de la circulation de ces fluides à un symposium en juin 2005 à Istanbul.

e) Le travail sur l'inhomogénéité des propriétés élastiques des grandes failles transformantes est maintenant publié.

f) Un nouveau programme de recherche, financé par la compagnie Total, s'intéresse à la tectonique tertiaire au confins du Texas et du Mexique, en lien avec l'évolution des bassins sédimentaires sur la marge du Golfe du Mexique. Cette étude a été présentée dans un colloque célébrant le centenaire de la Société Géologique du Mexique. Deux articles ont été soumis. Une extension à la marge mexicaine est en cours en coopération avec la compagnie Pemex.

ACTIVITÉS DIVERSES DE XAVIER LE PICHON

Du 1^{er} au 6 juin 2004

Travail de recherche à Istanbul et Ankara sur la tectonique de la mer de Marmara en collaboration avec le Pr Celal Sengor de l'Université Technique d'Istanbul et la compagnie pétrolière TPAO.

Du 7 au 9 juillet 2004

IODP Science Planning and Policy Oversight Committee Second Meeting à Paris.

Du 20 au 21 septembre 2004

Présentation invitée à la Réunion des Sciences de la Terre à Strasbourg.

Du 28 septembre au 6 octobre 2004

Symposium de la Fondation John Templeton à Nassau (Bahamas).

Du 11 au 13 octobre 2004

Participation au symposium « L'homme face au climat » au Collège de France.

Du 30 octobre au 10 novembre 2004

Conférence inaugurale invitée à la réunion marquant le centenaire de la Société géologique du Mexique puis travaux de terrain.

Du 9 au 14 décembre 2004

IODP Science Planning and Policy Oversight Committee Third Meeting à San Francisco.

25 février 2005

Participation au Colloque « Pour un réseau d'alerte tsunami en Méditerranée Occidentale » à Nice.

Du 31 mars au 3 avril 2005

Rencontre « Science et Société : mémoire et évolution » organisée à Évian-les-Bains par Michel Serre.

23 mai 2005

Communication à la conférence de l'ENSAE sur « La modélisation et les mathématiques appliquées ».

PUBLICATIONS DE L'ÉQUIPE DE GÉODYNAMIQUE

Année 2004

BOURLANGE S., JOUNIAUX L., and HENRY P. : Data report : Permeability, Compressibility, and Friction Coefficient Measurements under confining Pressure and Strain of Samples from Leg 190, Nankai Trough, *ODP Sci. Results*, 190/196, 2004.

CATTIN R., LOEVENBRUCK A., and LE PICHON X. : Why does the co-seismic slip of the 1999 Chi-Chi (Taiwan) earthquake increase progressively northward on the plane of rupture ? *Tectonophysics*, 386, 67-80, 2004.

DE GARIDEL-THORON T., BEAUFORT L., BASSINOT F., and HENRY P. : Evidence for large methane releases to the atmosphere from deep-sea gas hydrate dissociation during the last glacial episode, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 10.1073/pnas.0402909101, 2004.

HUGUEN C., MASCLE J., CHAUMILLON E., KOPF A., WOODSIDE J., and ZITTER T. : Structural setting and tectonic control of the mud volcanoes from the central Mediterranean Ridge (Eastern Mediterranean). *Marine Geology*, 209, 245-263, 2004.

KREEMER C. and CHAMOT-ROOKE N. : Contemporary kinematics of the southern Aegean and the Mediterranean Ridge, *Geophys. J. Int.*, 157, 1377-1392, 2004.

KREEMER C., CHAMOT-ROOKE N., and LE PICHON X. : Constraints on the evolution and vertical coherency of deformation in the Northern Aegean from a comparison of geodetic, geologic, and seismologic data, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 225, 329-346, 2004.

HENRY P. and **BOURLANGE S.** : Smectite and fluid budget at Nankai ODP Sites derived from cation exchange capacity, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 209, 103-112, 2004.

LOEVENBRUCK A., **CATTIN R.**, **LE PICHON X.**, **DOMINGUEZ S.** and **MICHEL R.** : Co-seismic slip resolution and post-seismic relaxation time of the 1999 Chi-Chi earthquake as constrained by geological observations, geodetic measurements and seismicity, *Geophys. J. Int.*, 158, 310-326, 2004.

MARTIN V., **HENRY P.**, **NOUZE H.**, **NOBLE M.**, **ASHI J.** and **PASCAL G.** : Erosion and sedimentation as processes controlling the BSR-derived heat flow on the Eastern Nankai Margin., *Earth Planet. Sci. Lett.*, 222 (1), 131-144, 2004.

NIELSEN C., **CHAMOT-ROOKE N.**, **RANGIN C.** and **THE ANDAMAN CRUISE TEAM** : From partial to full strain partitioning along the Indo-Burmese hyper-oblique subduction, *Marine Geology*, 209, 1-4, 303-327, 2004.

NOUZE H., **HENRY P.**, **NOBLE M.**, **MARTIN V.** and **PASCAL G.** : Large gas hydrate accumulations on the eastern Nankai Trough inferred from new high-resolution 2-D seismic data, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L13308, doi :10.1029/2004GL019848, 2004.

RANGIN C., **LE PICHON X.**, **DEMIRBAG E.** and **IMREN C.** : Strain localisation in the sea of Marmara. Propagation of the North Anatolian Fault in a narrow inactive pull-apart. *Tectonics*, 23 (2), TC2014, doi :10.1029/2002TC001437, 2004.

SIMOES M., **AVOUAC J.P.**, **CATTIN R.** and **HENRY P.** : The Sumatra subduction zone : A case for a locked fault zone extending into the mantle, *J. Geophys. Res.*, 109, B10402, doi :10.1029/2003JB002958, 2004.

TEN VEEN J., **WOODSIDE J.**, **ZITTER T.A.C.**, **DUMONT J.F.**, **MASCLE J.** and **VOLKONSKAIA A.** : Neotectonic evolution of the Anaximander Mountains at the junction of the Hellenic and the Cyprus Arc. *Tectonophysics*, 391, 35-65, 2004.

WERNE J.P., **HAESE R.**, **ZITTER T.**, **ALOISI G.**, **BOULOUBASSI I.**, **HEIJS S.**, **FIALA-MEDIONI A.**, **PANCOST R.**, **SINNINGHE DAMSTE J.**, **DE LANGE G.**, **FORNEY L.**, **GOTTSCHAL J.**, **FOUCHER J.P.**, **MASCLE J.**, **WOODSIDE J.** and **THE MEDINAUT & MEDINETH Shipboard party.** 2004. Life at cold seeps : A synthesis of ecological and biogeochemical data from Kazan mud volcano, eastern Mediterranean Sea. *Chemical Geology*, 205 (3-4), 367-390, 2004.

Année 2005 (avant juin)

BOUSQUET R., **GOFFÉ B.**, **LE PICHON X.**, **DE CAPITANI C.**, **CHOPIN C.** and **HENRY P.** : Comment of « Subduction Factory : 1. Theoretical mineralogy, densities, seismic wave speeds, and H₂O contents » by Bradley R. Hacker, Geoffrey A. Abers, and Simon M. Peacock, *J. Geophys. Res.*, 110, B02206, doi :10.1029/2004JB003450, 2005.

LE PICHON X., **KREEMER C.** and **CHAMOT-ROOKE N.** : Asymmetry in elastic properties and the evolution of large continental strike-slip faults, *J. Geophys. Res.*, 110, B03405, doi :10.1029/2004JB003343, 2005.

SENGOR C., TUYSUZ O., IMREN C., SAKIN M., EYIDOGAN H., GORUR N., **LE PICHON X.** and **RANGIN C.** : The North Anatolian Fault : A new look, *Earth Science Reviews*, Volume 33, 2005 (doi :10.1146/annurev.earth.32.101802.120415).

ZITTER T.A.C., HUGUEN C., WOODSIDE J.M. : 2005, Geology of mud volcanoes in the Eastern Mediterranean from combined sidescan sonar and submersible surveys. *Deep Sea Research*, 52 (3), 457-475, 2005.