



La tectonophysique en Russie et en France : un projet initié par Jacques Angelier

Tectonophysics in Russia and France: A project initiated by Jacques Angelier

Avant-propos

Ce numéro spécial du *CR Geoscience* résulte d'une initiative de Jacques Angelier, soutenue par Fedor Yakovlev, qui avaient proposé de co-éditer les actes d'une conférence rassemblant différents instituts de recherche de la fédération des états de Russie, tenue à Moscou du 13 au 17 octobre 2008 sur le thème de la Tectonophysique et d'autres problèmes d'actualité pour les Sciences de la Terre. Cette conférence célébrait aussi le 40^e anniversaire du laboratoire de Tectonophysique fondé à l'Institut de physique de la Terre de l'Académie russe des sciences par le professeur Gzovsky.

Cette conférence comprenait 134 présentations orales et 60 posters présentés par des chercheurs provenant de 26 villes de Russie et de 13 autres républiques de la confédération, i.e. l'Ukraine, l'Ouzbékistan, le Kirgystan, le Kazakhstan et la Géorgie. Les principaux thèmes abordés étaient les suivants :

- bases théoriques de la tectonophysique et ses liens avec les autres disciplines scientifiques ;
- la modélisation de la déformation des roches et ses applications ;
- le rôle de la géodynamique dans les études de contraintes et de déformations ;
- les failles en tant qu'objets géologiques et physiques ;
- les applications de la tectonophysique à la prospection et à l'extraction des minerais ;
- la tectonique régionale, les données géophysiques et sismologiques, et les cas d'études.

Une liste complète des présentations est accessible sur le site internet de la conférence (http://tph_2008.ifz.ru/index_en.html), tandis que le programme complet en russe est consultable sur le site http://tph_2008.ifz.ru/Program.html.

Un large spectre de sujets a pu être débattu lors de cette conférence, permettant de connaître l'état de l'art de

Foreword

This special issue of the *CR Geoscience* results from an initiative of Jacques Angelier, with organizational support of Fedor Yakovlev, who proposed to edit jointly the proceedings for the All-Russian conference held in Moscow on 13–17 October, 2008, focusing on “Tectonophysics and current problems of Earth sciences”. This conference aimed at celebrating the 40 year anniversary of the Tectonophysics laboratory founded at IPE RAS by M.V. Gzovsky.

The conference itself involved 134 oral and 60 poster presentations by Earth scientists from 26 Russian cities and 13 countries including Ukraine, Uzbekistan, Kyrgyzstan, Kazakhstan, and Georgia. It focused on the following topics:

- theoretical background of tectonophysics and its links with other scientific disciplines;
- modeling of rock deformation and its applications;
- geodynamic input of stress and strain studies;
- faults as geological and physical objects;
- tectonophysics applied to prospecting and mining of ore deposits;
- regional tectonics, geophysical and seismological data – Case studies.

The list of presentations can be found at the Conference website (http://tph_2008.ifz.ru/index_en.html) and the complete program in Russian at http://tph_2008.ifz.ru/Program.html.

A wide scope of topics was discussed at the conference. It made it possible to understand state-of-the-art methods and to formulate a list of problems which are still waiting to be solved. Among such problems are:

- mechanism responsible for stress accumulation in intraplate domains;

certaines méthodes, mais aussi de compiler une liste de questions encore non résolues. Parmi les problèmes restant à résoudre, nous pouvons citer :

- les mécanismes générateurs de contraintes en domaine intraplaque ;
- les liens entre les processus internes et externes générateurs de contraintes dans la croûte terrestre ;
- le développement et le rôle des contraintes résiduelles dans la croûte ;
- les relations entre les composantes verticales et horizontales des déplacements récents ;
- la genèse des reliefs ;
- les processus physiques, les déformations et les ciments des zones faillées, et leur impact sur les propriétés mécaniques ;
- la structure et la rhéologie des différentes enveloppes de la croûte et de la lithosphère ;
- les mécanismes contrôlant l'apparition et le développement du fluage de la croûte inférieure ;
- les mécanismes contrôlant le plissement à différentes échelles.

Les documents de la conférence ont été résumés et publiés en russe en 2009 dans l'ouvrage « Tectonophysique et problèmes actuels en Sciences de la Terre : célébration du 40^e anniversaire de la fondation par le Pr. Gzovsky du laboratoire de tectonophysique de l'Institut de physique de la Terre de l'académie russe des sciences », édité par A.O. Gliko et Yuri G. Leonov. Ce livre comprend 2 volumes, le premier de 542 pages et le second de 426 pages, l'ensemble rassemblant 108 articles de 5 à 7 pages.

Cette conférence a eu un très fort impact sur la poursuite des études de tectonophysique en Russie et dans les autres pays de la fédération. Ainsi, une autre conférence importante, organisée par le laboratoire de tectonophysique de l'Institut de la croûte terrestre (branche sibérienne de l'Académie russe des sciences) a eu lieu à Irkutsk en août 2009 sur la « Fracturation et sismicité de la lithosphère : concepts tectonophysiques et implications » (<http://gt.crust.irk.ru/>). La première école de tectonophysique pour jeunes chercheurs a aussi été organisée en 2009 à Moscou, et la seconde à l'automne 2011.

Ces recherches scientifiques sont surtout menées en Russie dans les instituts de l'académie. Parallèlement, des conseils spéciaux interinstitutionnels ont été mis en place pour coordonner les efforts et discuter des principaux problèmes et perspectives. L'un de ces conseils, le comité tectonique interdépartemental, existait déjà avant la conférence de 2008, mais il ne comprenait pas encore de section tectonophysique. Désormais en 2012, lors de la parution de ce numéro spécial du *CR Geoscience*, la situation a changé. Tout d'abord, ce comité a été réorganisé sous la forme d'un conseil scientifique dédié aux problèmes de Tectonique et de Géodynamique, présidé par Yuri G. Léonov. Ensuite, et c'est un fait important à signaler ici, une section de tectonophysique présidée par Yuri L. Rebetsky a désormais été introduite dans ce conseil. Ceci traduit de fait l'importance prise par les méthodes

- relationships between external and internal sources generating stresses in the Earth's crust;
- genesis and role of the residual stresses in the Earth's crust;
- relationships between vertical and horizontal components of recent movements;
- problems of mountain building;
- physical processes, deformation features and cements in fault zones and their impact on mechanical properties;
- structural and rheological zonation of the Earth's crust and lithosphere;
- mechanism of large-scale brittle deformation of the crust;
- genesis and mechanism of lower crustal flow;
- mechanism of folding at different scales.

Conference materials were summarized and published in Russian in 2009 in the book "Tectonophysics and modern problems in Earth sciences. A celebration of the 40-year anniversary of the foundation by M. Gzovsky of the Tectonophysics laboratory in IPE RAS", edited by A.O. Gliko and Yuri G. Leonov. This book comprises two volumes, with 452 pages in the first volume and 426 pages in the second volume. Altogether, they incorporate 108 papers of 5–7 pages each.

The Conference had a great impact on further tectonophysical studies in Russia and CIS countries. For instance, another large conference was held in Irkutsk in August 2009 on "Faulting and seismicity in the lithosphere: tectonophysical concepts and implications" at which ca. 200 presentations were given. The journal "Geodynamics and tectonophysics" (<http://gt.crust.irk.ru/>) was established by the tectonophysics laboratory of the Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, in Irkutsk. The first Tectonophysics School for young scientists was organized in Moscow in 2009, and the second one in autumn 2011.

Scientific research is concentrated in the academic institutes in Russia. At the same time, special inter-institutional councils have been organized for the coordination of effort and discussion of important problems and perspectives. One of these councils, the so-called Interdepartmental Tectonic Committee, already existed before the conference organized in 2008. However, there was no special tectonophysics section in this committee. But now in 2012, when this Special Issue of *CR Geoscience* is ready for publication, the situation has changed. First of all, the committee is now re-organized into a Scientific Council on Tectonic and Geodynamic problems and chaired by Yuri G. Leonov. Second, and this is of special importance in this case, a Tectonophysics section chaired by Yuri L. Rebetsky has now been established within the Council. This reflects the tendency to emphasize the role of tectonophysical methods in tectonic and geodynamic studies. The needs for new methodologies are gradually growing in tectonic studies since the last decade: ideal schemes developed several decades ago are still being used, whereas new models are mostly qualitative and remain to be tested against real case studies. The urgent demand is to move towards quantitative models in tectonics and geody-

tectonophysiques pour les études de tectonique et de géodynamique. Le besoin de nouvelles méthodologies s'est fait sentir dans la dernière décade pour les études de tectonique. Même si les schémas conceptuels développés il y a quelques dizaines d'années sont toujours valides, les nouveaux modèles sont encore souvent qualitatifs et doivent encore être validés sur des cas réels. Il y a aussi une demande croissante pour passer à des approches quantitatives en tectonique et en géodynamique. En cette période de transition, la tectonophysique occupe une position dominante.

Liens scientifiques entre la France et la Russie

Après l'effondrement de l'URSS en 1991 et la crise économique qui a suivi de 1991–2000, nombre de centres de tectonophysique n'ont pas survécu en Russie et dans le reste de la fédération. Les coupures de budget ont affecté aussi bien les travaux de terrain que les projets de modélisation. Inversement, les progrès des moyens de calcul ont permis de développer de nouveaux codes numériques, et de poursuivre des études de contraintes à partir de l'analyse des fractures et des mécanismes au foyer des tremblements de terre. Jacques Angelier est venu pour la première fois en Russie en 1992, au printemps, pour donner une conférence invitée lors du colloque sur l'« Évolution géodynamique des bassins sédimentaires » organisé à Moscou par François Roure et Igor Skvortsov, à l'instigation de l'Institut français du pétrole, de l'IGIRGI et du VNIGNI. À cette occasion, Jacques fut aussi invité à visiter de façon informelle le laboratoire de tectonophysique de l'Institut de physique de la Terre de l'Académie russe des sciences, afin de voir les travaux qui y étaient effectués sur la détection in situ des champs de contrainte. Depuis cette époque, de nombreuses collaborations se sont établies sur plusieurs thématiques. Des travaux de terrain ont été menés de façon conjointe en 1993–1996 dans le Caucase et en Crimée, dans le cadre du projet Péri-Téthys, visant à reconstituer les paléo-contraintes à partir des données de micro-tectonique. La thèse d'Aline Saintot fut alors démarrée sous la direction de Jacques Angelier, tandis que la thèse de Yelena Nikitina était encadrée par Jacques et Yuri Rebetsky. Après quelques interruptions, cette collaboration scientifique avait redémarré dès 2005, Jacques Angelier ayant ainsi donné 2 présentations invitées, lors de la fameuse conférence de Tectonophysique de 2008 dont nous venons de faire état.

Jacques Angelier et la Russie

La vivacité de Jacques Angelier (Fig. 1), son charisme et son optimisme joints à ses capacités exceptionnelles, sa curiosité scientifique, ses compétences techniques et organisationnelles ont contribué sans aucun doute à l'excellente réputation qu'il a su acquérir auprès de la communauté scientifique de Russie et de l'ensemble de la fédération. Outre ces collaborations scientifiques, Jacques s'intéressait aussi énormément à la vie sociale et culturelle russe et à son histoire. Il avait ainsi réussi à percevoir les faces cachées de la Russie, qui restent le plus souvent un

namics. In this transition phase, the role of tectonophysics is the leading one.

Scientific links between France and Russia

After the collapse of the USSR in 1991 and subsequent economical problems in 1991–2000, some tectonophysics centers in Russia and CIS countries did not survive. Cutting of funds affected both field geological studies and modeling. On the other hand, progress in computer technologies made it possible to develop numerical modeling and to carry stress field analysis on fractures and earthquake sources. Jacques Angelier came for the first time to Russia in spring 1992 to give a key note presentation at the conference on the “Geodynamic evolution of sedimentary basins”, organized in Moscow by François Roure and Igor Skvortsov, on behalf of IFP, IGIRGI and VNIGNI. During his stay in Moscow, Jacques was invited for an unplanned visit to the IPE RAS laboratory of tectonophysics to see the results of stress field detection in nature. Since that time, joint research has started in several directions. Joint field works were conducted in the Caucasus and Crimea in the frame of the Peri-Tethys Project in 1993–1996, aiming at analyzing paleo-stress based on brittle deformation features. The Ph.D. thesis of Aline Saintot was initiated under the guidance of Jacques Angelier, whereas the Ph.D. thesis of Yelena Nikitina was performed under joint guidance of Jacques and Yuri Rebetsky. After some interruptions, scientific contacts resumed in 2005, Jacques Angelier being, for instance, invited to give two key notes at the aforementioned Tectonophysics Conference in 2008.

Jacques Angelier and Russia

The vivid mind of Jacques Angelier (Fig. 1), his charm and optimism together with striking performance capacity, wide scope of scientific interests and combination of scientific and organizing abilities ensured him a very high reputation among scientists in Russia and CIS countries. Besides scientific collaboration he was keenly interested in different aspects of modern life in Russia and its history. With time passing he has understood and felt those sides of the country, which usually remain a mystery for most of Europeans. Jacques Angelier said once: there is no sense in telling about Russia, one has to come, see and feel it himself. He stressed several times that a strong Russia is what the Europe will need in the future. The success of the conference in 2008 was not only in its scientific results. Very important was to understand the importance of common scientific goals to develop an united spirit. The first day after the conference, Jacques Angelier noted: “Everybody looks happy!”. Since that day and for ever, Jacques Angelier will remain one of the most competent Earth scientists for the Russian community. The loss of Jacques Angelier in January 2010 was a great grief for France, but also for so many scientists in Russia and neighboring countries.

Russian papers included in this issue benefited greatly from the careful editing of Hélène Paquet and José

mystère pour le reste de l'Europe. Jacques Angelier s'était ainsi exprimé : « Cela ne sert à rien de se faire décrire la Russie, il faut y aller soi-même et s'en faire une idée sur place », rappelant que l'Europe aurait toujours besoin dans le futur d'une Russie puissante. Clairement, le succès de la conférence de 2008 ne fut pas seulement un succès scientifique. Elle permit aussi à chacun de réaliser l'importance d'avoir des objectifs communs et un esprit d'équipe. Le lendemain de la conférence, Jacques rajoutait : « Tout le monde semble content ! ». Depuis ce jour et pour toujours, Jacques Angelier restera l'un des géologues les plus compétents aux yeux de la communauté russe. Le décès de Jacques en janvier 2010 a été une perte terrible pour les géosciences en France, mais aussi pour celles de Russie et des autres pays de la fédération.

Les articles russes contenus dans ce numéro ont bénéficié de la lecture attentive de Mme Héléne Paquet et de M. José Honnorez. Ces quelques articles ne donnent qu'une image très partielle de l'immense diversité des travaux de tectonophysique menés en Russie et dans le reste de la fédération. Afin de rendre compte aussi des apports à la communauté internationale des travaux de Jacques Angelier sur la tectonique cassante et son intérêt récurrent pour la Russie et les pays associés, ce numéro comporte aussi quelques articles de ses anciens étudiants, de son équipe de recherche et de son école de pensée.

Les quatre premiers articles fournissent un panorama des études russes dans les domaines de la tectonophysique, des modes de plissement, avec également des études de cas dans le Tien Shan et la région du lac Baïkal. Dans le premier papier, Yuri L. Rebetsky (2012) fait une revue des principaux apports des études tectonophysiques russes dans le domaine des champs de contrainte et de la modélisation des déformations. Il y parle aussi de la physique des tremblements de terre et des mécanismes de genèse de contraintes déviatoriques dans la croûte. Dans le second article, Fedor L. Yakovlev (2012) s'attache à déterminer les taux de déformation atteints pour différents degrés de plissement. Dans le troisième papier, Viacheslav N. Voytenko et Andrey K. Khudoley (2012) décrivent les premiers stades de développement de la faille de Talas-Ferghana en Asie centrale, tandis que l'article suivant d'Oxana V. Lunina (2012) et ses collaborateurs est dédié à la prospection géo-électrique et son apport à l'étude de l'architecture profonde des rifts de la région du Baïkal.

La section suivante est consacrée à l'apport de l'école de Jacques Angelier à la tectonophysique, regroupant ainsi 7 articles combinant les expertises russes et françaises dans les domaines de la fracturation et de la reconstruction des paléo-contraintes. Dans son article, Olivier Lacombe (2012) discute de la représentativité des paléo-contraintes déterminées par l'inversion des données de glissement mesurées sur les failles par rapport aux mesures in situ des contraintes actuelles. Dans les articles suivants, Lidiya A. Sim (2012) décrit la façon dont elle a démêlé l'histoire polyphasée des veines de quartz et des fractures de la partie arctique de l'Oural, tandis qu'Anton V. Marinin et Aline Saintot (2012) ont appliqué et comparé des techniques différentes de reconstruction des paléo-contraintes sur le même secteur du Grand Caucase. Dans une

Honnorez. These papers are only partly reflecting the huge diversity of researches in tectonophysics in Russia and CIS. In order to acknowledge the International input of Jacques Angelier's studies on brittle tectonics and his long-term interest for Russia and CIS, this issue includes as well a few papers from his former French students, scientific team and school.

The first four papers provide an overview of Russian studies in the fields of tectonophysics, folding processes, and case studies in the Tien Shan and Baikal regions. In the first paper, Yuri L. Rebetsky (2012) presents a review of the basic achievements of Russian tectonophysics studies in the fields of natural stress and modeling of deformation structures. He also discusses questions related to earthquake physics and generation mechanisms of deviatoric stresses in the Earth's crust. The second paper, by Fedor L. Yakovlev (2012), focuses on the determination of final strain value for different ranks of folding. In the third paper, Viacheslav N. Voytenko and Andrey K. Khudoley (2012) document the early evolutionary stages of the Talas-Ferghana Fault in central Asia, whereas in the following paper, Oxana V. Lunina et al. (2012) document the use of geoelectric prospecting to unravel the deep architecture of rift basins in the Baikal region.

In the next section, which reflects the strong inheritance of Jacques Angelier in tectonophysics, 7 papers, combining Russian and French expertise, are dealing brittle tectonics and paleo-stress reconstructions. In his paper, Olivier Lacombe (2012) discusses the significance of paleo-stress reconstructions based on the inversion of fault slip data with respect to contemporary stresses. In the following paper, Lidiya A. Sim (2012) describes the way she could unravel the multiphase history of quartz veins and fractures in the Polar Urals, whereas Anton V. Marinin and Aline Saintot (2012) applied and compared different techniques of paleo-stress reconstruction in the part of the Great Caucasus. In another contribution from Angelier's school, Françoise Bergerat and Romain Plateaux (2012) describe the architecture of Plio-Quaternary faults and fissures in a volcanic area in Iceland. In the next paper, Jean-Claude Hippolyte et al. (2012) document Quaternary deformations at the front of the Alps in Provence. Still dealing with brittle tectonics, the two last papers of this section relates to case studies in Siberia and central Asia: Georgy N. Gogonenkov and A.I. Timurziev (2012) provide a nice set of seismic profiles and maps documenting the effects of strike-slip faulting in the West Siberian platform, whereas, Anna V. Parfeevets (2012) has attempted to reconstruct the Late Cenozoic stress fields of the Mongolian microplate.

Going back to focal mechanisms and earthquake studies, the next paper by Rakhimjan A. Umurzakov (2012) deals with some large earthquakes of the Tien Shan.

Last but not least, the invited paper of this special issue, authored by Sami Khomsi and two other Tunisian colleagues (2012), provides a direct application of structural and fracture analyses for the study of deep aquifers and prediction of their geothermal potential.

autre contribution de l'école de Jacques Angelier, **Françoise Bergerat et Romain Plateaux (2012)** décrivent l'architecture des failles et fissures plio-quadernaires d'un secteur volcanique de l'Islande. Dans la suivante, **Jean-Claude Hippolyte et ses collaborateurs (2012)** décrivent les déformations quadernaires au front de l'arc alpin en Provence. Toujours dans le domaine de la tectonique cassante, les derniers articles de cette section ont trait à des études de cas en Sibérie et en Asie centrale : **Georgy N. Gogonenkov et A.I. Timurziev (2012)** fournissent un bel ensemble de profils sismiques et de cartes illustrant les effets de décrochements profonds au sein de la plateforme ouest-sibérienne, tandis qu'**Anna V. Parfeevets (2012)** tente de reconstruire de champ des contraintes finicénozoïques de la microplaque mongole.

Réexaminant les mécanismes au foyer et les études de séismes, **Rakhimjan A. Umurzakov (2012)** revient sur les contraintes régionales et la géométrie des structures associées à quelques séismes importants du Tien Shan.

Enfin, le dernier papier invité de ce numéro, rédigé par **Sami Khomsi et deux autres collègues tunisiens (2012)**, concerne l'application de l'analyse structurale et des fractures pour l'étude des aquifères profonds et la prédiction du potentiel géothermique.

Références

- Bergerat, F., Plateaux, R., 2012. Architecture and development of (Pliocene to Holocene) faults and fissures in the East Volcanic Zone of Iceland. *C. R. Geoscience 344* (this issue), doi:10.1016/j.crte.2011.12.005.
- Gogonenkov, G.N., Timurziev, A.I., 2012. Strike-slip faulting in the West Siberian Platform: Insights from 3D seismic imagery. *C. R. Geoscience 344* (this issue), doi:10.1016/j.crte.2011.09.010.
- Hippolyte, J.C., Bellier, O., Espurt, N., 2012. Quaternary deformation and stress perturbations along the Digne thrust front, Southwestern Alps Deformation. *C. R. Geoscience 344* (this issue), doi:10.1016/j.crte.2012.03.002.
- Khomsi, S., Chibi, O., Slimani, N., 2012. Structural control on the deep hydrogeological and geothermal aquifers related to the fractured Campanian-Miocene reservoirs of north-eastern Tunisia foreland constrained by subsurface data. *C. R. Geoscience 344* (this issue), doi:10.1016/j.crte.2012.02.002.
- Lacombe, O., 2012. Do fault slip data inversions actually yield "paleo-stresses" that can be compared with contemporary stresses? A critical discussion. *C. R. Geoscience 344* (this issue), doi:10.1016/j.crte.2012.01.006.
- Lunina, O.V., Nevedrova, N.N., Gladkov, A.S., 2012. Tectonic and geoelectric structure of rift basins in the Baikal region. *C. R. Geoscience 344* (this issue), doi:10.1016/j.crte.2011.12.008.
- Marinin, A.V., Saintot, A., 2012. Comparison of methods to reconstruct paleostress regimes in the NW-Greater Caucasus fold-and-thrust belt. *C. R. Geoscience 344* (this issue), doi:10.1016/j.crte.2012.01.004.
- Parfeevets, A.V., Sankov, V.A., 2012. Late Cenozoic tectonic stress fields of the Mongolian microplate. *C. R. Geoscience 344* (this issue), doi:10.1016/j.crte.2011.09.009.
- Rebetsky, Y.L., 2012. Achievements of tectonophysics research in Russia: Present status and perspective. *C. R. Geoscience 344* (this issue), doi:10.1016/j.crte.2011.12.007.
- Sim, L.A., 2012. Some methodological aspects of tectonic stress reconstruction based on geological indicators. *C. R. Geoscience 344* (this issue), doi:10.1016/j.crte.2011.11.003.



Fig. 1. Jacques Angelier, devant le Kremlin.

Fig. 1. Jacques Angelier, in front of the Kremlin.

- Umurzakov, R.A., 2012. Late Cenozoic tectonic stresses and focal mechanism of some of the largest earthquakes of the Tien Shan Region. *C. R. Geoscience 344* (this issue), doi:10.1016/j.crte.2012.03.003.
- Voytenko, V.N., Khudoley, A.K., 2012. Structural evolution of metamorphic rocks in the Talas Alatau, Tien Shan, Central Asia: Implication for early stages of the Talas-Perghana Fault. *C. R. Geoscience 344* (this issue), doi:10.1016/j.crte.2011.11.004.
- Yakovlev, F.L., 2012. Methods for detecting formation mechanisms and determining final strain value for different scales of folded structures. *C. R. Geoscience 344* (this issue), doi:10.1016/j.crte.2012.02.005.

Yuri G. Leonov
Russian Academy of Sciences, Russia

François Roure*
*IFP énergies nouvelles, 1 et 4, avenue de Bois-Préau,
92852 Rueil-Malmaison cedex, France*

Yuri L. Rebetsky
Fedor L. Yakovlev
*Laboratory of Tectonophysics, Institute of Physics of the Earth,
Russian Academy of Sciences (IPE RAS), ul. Bol'shaya
Gruzinskaya 10, Moscow, 123995 Russia*

*Auteur correspondant.
*Adresses e-mail : Francois.Roure@ifpen.fr (F. Roure)
yak@ifz.ru (Y.L. Rebetsky)*

Disponible sur Internet le 27 avril 2012