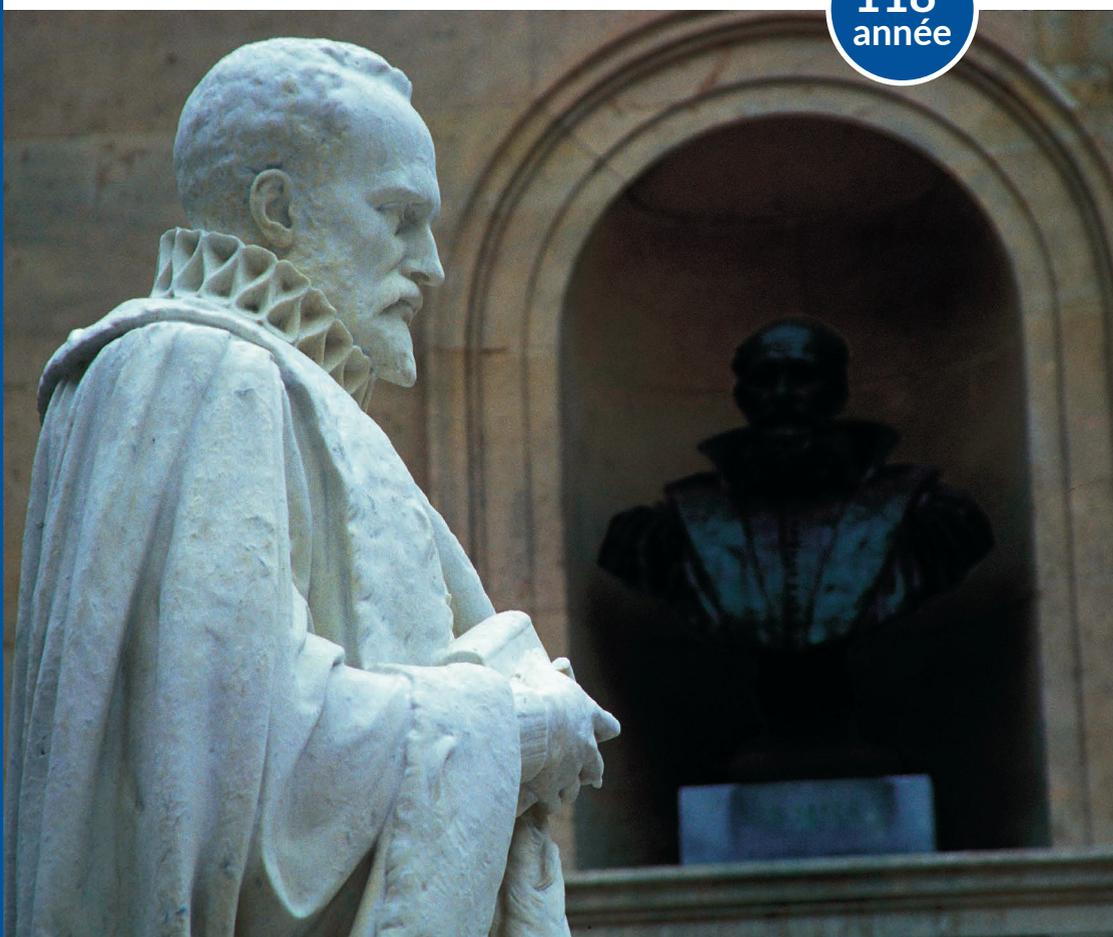


ANNUAIRE du **COLLÈGE DE FRANCE** 2017 - 2018

Résumé des cours et travaux

118^e
année



COLLÈGE
DE FRANCE

— 1530 —

PHYSIQUE DE L'INTÉRIEUR DE LA TERRE

Barbara ROMANOWICZ

Membre de l'Institut (Académie des sciences),
professeure au Collège de France

Mots-clés : physique, Terre, sismologie, séismes géants, tectonique des plaques, imagerie interne de la Terre

La série de cours « Les grands tremblements de terre » est disponible, en audio et vidéo, sur le site internet du Collège de France <https://www.college-de-france.fr/site/barbara-romanowicz/course-2017-2018.htm>, ainsi que les colloques « Great Earthquakes: Observations and Modeling » (<https://www.college-de-france.fr/site/barbara-romanowicz/symposium-2017-2018.htm>) et « 50 years of Plate Tectonics: then, now, and beyond » (https://www.college-de-france.fr/site/barbara-romanowicz/symposium-2017-2018__1.htm).

ENSEIGNEMENT

COURS – LES GRANDS TREMBLEMENTS DE TERRE

Comprendre la physique du déroulement de la rupture d'un grand séisme – tel qu'ils se produisent dans les zones de subduction autour du Pacifique –, depuis sa phase préparatoire jusqu'à ses effets destructeurs en champ proche ou lointain, est une question majeure d'intérêt socioéconomique. Depuis quelques décennies, grâce aux efforts importants d'instrumentation sismique et géodésique (en particulier GPS) dans certaines zones concernées, et du fait de l'occurrence récente d'une série de séismes géants (Sumatra 2004, Chili 2010, 2014, 2015, Japon 2011), un riche ensemble de données a pu être recueilli à une résolution spatiale et temporelle sans précédent. Conjointement à des calculs numériques rendus possibles par les avancées informatiques, cela a permis un essor nouveau dans le développement de modèles mécaniques et cinématiques de la rupture sismique.

Ce cours, ainsi que le colloque international qui lui a été associé, a eu pour but de faire le point de nos connaissances sur les processus physiques à l'origine des très forts tremblements de terre.

La première séance a été consacrée à une introduction historique générale, présentant la progression des connaissances sur les tremblements de terre depuis l'Antiquité jusqu'aux premières mesures instrumentales de magnitude des séismes. Nous y avons introduit quelques notions fondamentales, telle la notion d'intensité sismique, et montré quelques statistiques sur l'occurrence des séismes géants. Nous avons également rappelé les notions fondamentales de la tectonique des plaques.

Dans la deuxième séance, nous avons introduit la loi de Gutenberg-Richter, le comportement de « stick-slip » et la notion de « cycle sismique », puis la théorie des « lacunes sismiques », introduite à la fin des années 1970, mais qui s'est depuis avérée peu fiable. Nous en avons donné quelques exemples. Nous avons abordé la quantification des séismes, et introduit les différentes mesures modernes de la « taille » d'un séisme : diverses définitions de la magnitude, notion physique de « moment sismique », du tenseur des moments associé et de la magnitude de moment (notée M_w).

Nous avons présenté dans la troisième séance la notion de mécanisme à la source et nous avons décrit les représentations conventionnelles des différents mouvements sur les failles, suivant le contexte tectonique. Nous avons introduit quelques notions d'élasticité et l'équation des ondes élastiques ainsi que la notion de fonction de Green pour représenter la propagation des ondes dans un milieu élastique donné. Ceci nous a conduit à décrire brièvement la méthode de détermination du tenseur des moments « CMT » (*centroid moment tensor*), qui permet d'obtenir le moment sismique, le mécanisme à la source (géométrie du plan de faille et du glissement, profondeur moyenne de la rupture) à partir de données téléseismiques (enregistrements à grande distance) de longue période (périodes supérieures à 30 secondes). Nous avons introduit la notion de rupture complexe, étendue en temps et en espace, et les définitions des « barrières » et « aspérités » sur une faille. Nous avons présenté le modèle simple de dislocation de Haskell, la fonction temporelle de la source, le spectre à la source correspondant, et la notion de fréquence-coin, et illustré comment on peut actuellement déterminer rapidement, à partir des données téléseismiques, non seulement le tenseur des moments mais aussi la fonction temporelle de la source, et la directivité de la rupture (la direction de propagation de celle-ci). Nous avons ensuite abordé la question de la chute des contraintes et des relations d'échelle globales pour les séismes.

La quatrième séance a été consacrée aux méthodes d'imagerie de la source sismique avec illustrations. Nous avons en particulier montré les résultats de rétroprojection à la source pour le séisme géant de Sumatra de 2004 (M_w 9.3) et les caractéristiques du tsunami qui a suivi, ainsi que les méthodes de modélisation de la source de ce tsunami par observation à partir de satellites.

En continuant sur le thème de l'imagerie sismique, nous avons consacré la cinquième séance de ce cours aux grands séismes de Sumatra de 2004 et du Japon de 2011 (M_w 9.0, appelé « séisme de Tohoku » par les géophysiciens ou « séisme de Fukushima » dans les médias). Nous avons illustré, pour ces deux grands séismes tsunamigènes, les diverses observations sismiques et géodésiques disponibles pour la caractérisation de la rupture. Pour le séisme du Japon, il existe des documents historiques et paléogéologiques montrant la récurrence de tsunamis géants affectant la même région côtière depuis plusieurs millénaires. Nous avons décrit le système d'alerte sismique japonais, et expliqué pourquoi il avait bien fonctionné pour ce qui est des vibrations engendrées au sol, mais avait sous-estimé l'ampleur du tsunami. Les modèles de propagation de la rupture montrent que le déplacement le plus

important a eu lieu très à l'est, près de la fosse du Japon, sous l'eau, provoquant un tsunami géant. En revanche, les vibrations hautes fréquences qui provoquent des dégâts sur la terre ferme correspondent à un glissement moins fort (< 20 m comparé à > 50 m près de la fosse) et se sont concentrées plus à l'ouest, là où la faille se trouve à plus grande profondeur. Nous avons conclu en montrant des observations générales sur les caractéristiques des ruptures de séismes géants tsunamigènes de zone de subduction, observations qui se dégagent depuis l'étude des trois plus forts séismes de la dernière décennie : Sumatra (2004, Mw 9.2), Japon (2011, Mw 9.0) et Chili (2010, Mw 8.8).

La dernière séance a fait un tour rapide de phénomènes « autour des grands séismes », tels que répliques, microséismes répétitifs, glissements lents pré et post-sismiques, et relaxation viscoélastique. Nous avons décrit quelques observations portant sur la présence d'une phase de nucléation de la rupture, pendant laquelle le glissement lent s'accélère, observations qui alimentent les modèles actuels de mécanique de la rupture. Nous avons terminé en donnant un exemple d'observations satellitaires, encore sujettes à controverse, de signes précurseurs de séismes et de tsunamis : observations d'anomalies ionosphériques associées à plusieurs grands séismes récents, en particulier celui du Japon. Nous avons, hélas, manqué de temps pour parler d'autres phénomènes liés à l'interface des plaques autour des grandes ruptures, actuellement très étudiés, tels les tremors non volcaniques (NVT) et les séismes de très basse fréquence. Nous n'avons parlé qu'en passant de la mécanique de la rupture, et des études théoriques et expérimentales associées.

COLLOQUE – *GREAT EARTHQUAKES: OBSERVATIONS AND MODELING*

Le séminaire lié au cours a été réalisé sous la forme d'un colloque international en anglais de deux jours, qui s'est tenu du 30 novembre au 1^{er} décembre 2017. Il a rassemblé 19 présentations par des spécialistes à la pointe de plusieurs domaines concernés : modélisation spatio-temporelle de la rupture grâce à des méthodes de tomographie établie sur les données sismiques et géodésiques, observations de terrain (pour les grands séismes d'Asie centrale), observations de la déformation à grande échelle dans l'intervalle intersismique en Amérique du Sud, observations et caractéristiques des tsunamis, observations prometteuses de variations dans le champ de gravité au voisinage de la rupture avant le séisme du Japon de 2011, complexité de la rupture du séisme de Kouikoura (Nouvelle-Zélande, 2016) sont autant de sujets abordés au cours de ce colloque. Celui-ci a compris une séance poster lors de laquelle une vingtaine de jeunes chercheurs français et européens ont présenté leurs recherches, et s'est terminé par une table ronde, invitant le public à faire l'état des lieux de ce domaine de recherche et à identifier les questions fondamentales ouvertes qui pourraient être abordées dans un avenir proche.

COLLOQUE INTERNATIONAL – *50 YEARS OF PLATE TECTONICS: THEN, NOW AND BEYOND*

Ce colloque, non directement lié à mon cours, mais soutenu en partie par mes crédits de chaire et la fondation Hugot du Collège de France (ainsi que par l'ENS, Total et l'Ifremer), est le troisième colloque international – et le premier en France – à célébrer cette année le 50^e anniversaire de la révolution de la tectonique des

plaques, et plus particulièrement celui de l'article fondateur de Xavier Le Pichon, professeur émérite au Collège de France. Il s'est déroulé du 25 au 26 juin 2018. Parmi les 22 intervenants invités, nous avons eu la chance de pouvoir écouter trois des pionniers de cette révolution (X. Le Pichon, D. McKenzie et J. Morgan). D'autres intervenants ont mis en évidence les avancées récentes dans les observations et la compréhension des déformations des plaques tectoniques, soit au niveau régional, soit au niveau global. Plusieurs présentations se sont focalisées sur la structure et la dynamique profonde du manteau terrestre – et de sa relation avec les mouvements des plaques, par modélisation expérimentale ou numérique ou encore par imagerie sismique globale. Une sélection d'une dizaine d'articles issus des présentations et discussions de ce colloque est prévue pour publication dans la revue *Tectonics* sous le titre « 50 years of Plate Tectonics » dans l'année qui vient.

RECHERCHE

La recherche de mon équipe pendant l'année 2017-2018 comprend plusieurs volets :

1) **Étude de la structure et de l'anisotropie de la graine à l'aide des mesures de forme d'onde et de temps de parcours d'ondes sismiques qui la traversent.**

Ceci a donné lieu à trois publications, une première sur la structure moyenne de la « couche F » (les derniers 200-300 km dans le noyau liquide, au-dessus de la graine solide), montrant la présence d'atténuation forte dans cette région particulière vers laquelle sont expulsés les éléments légers (plus légers que le fer et le nickel) au cours de la cristallisation de la graine (Adam *et al.*, 2017). La deuxième publication montre à son tour la présence d'une zone de transition à atténuation également forte, vers 50 km de profondeur à l'intérieur de la graine, entre une région superficielle sans doute constituée de « mush » (mélange solide/liquide) et la région plus profonde, entièrement solide (Ibourichène et Romanowicz, 2018). La troisième publication concerne l'étude de l'anisotropie de la graine par le biais d'observations d'ondes sismiques de compressions qui la traversent deux fois entre la source et la station d'observation. Nous montrons que l'anisotropie requise n'est pas aussi forte que l'exigent certains modèles fondés sur des mesures plus conventionnelles (Frost et Romanowicz, 2018).

2) **Modèle global d'atténuation en cisaillement dans le manteau supérieur de la Terre.**

Cette étude, commencée depuis plus de quatre ans, a finalement abouti à un nouveau modèle 3D et a donné lieu à deux publications (Karaoglu et Romanowicz, 2017, 2018). La tomographie d'atténuation est un sujet très difficile, car les images obtenues sont facilement polluées par les effets de propagation complexes sur les amplitudes des ondes sismiques. Notre modèle reste à une résolution de longueur d'onde assez grande, mais confirme l'origine principalement thermique des hétérogénéités de structure dans le manteau supérieur.

3) **Première application d'une méthode de tomographie de formes d'onde sismiques mise au point précédemment et appelée « box tomography ».**

La tomographie de formes d'onde repose actuellement sur le calcul numérique du champ des ondes à chaque itération dans la construction d'un modèle de structure élastique à l'échelle globale et continentale, ce qui nécessite des calculs très lourds, surtout lorsque les trajets des ondes sont lointains. Une approche proposée dans notre équipe (*e.g.* Masson et Romanowicz, 2017, *GJI*) tend à réduire les calculs en

recollant le champ des ondes à l'extérieur d'une région donnée, calculé une seule fois dans un modèle de référence, avec le champ des ondes à l'intérieur de la « boîte », grâce à une technique introduisant des miroirs d'inversion temporelle. La première application a permis de développer un modèle 3D du manteau supérieur sous l'Amérique du Nord et de préciser les variations de la structure de la lithosphère dans les cratons (les parties très anciennes et stables du continent) – non toujours corrélées à l'âge de la croûte correspondante (Clouzet *et al.*, 2018). Nous avons également participé à une étude multidisciplinaire de la lithosphère des cratons, visant à expliquer les vitesses de cisaillement anormalement élevées observées dans certaines parties de ceux-ci. Nous avons proposé que les racines des cratons contiennent 1 à 2 % en volume de carbone sous la forme de diamant (Garber *et al.*, 2018). Cette étude, commencée en 2016 pendant l'école d'été du CIDER (Cooperative Institute for Dynamic Earth Research, www.deep-earth.org) a connu un grand succès sur internet. Avec Satish Maurya, actuellement en post-doc, et Jean-Paul Montagner de l'IPG de Paris, nous avons contribué à toute la partie sismologique de cette étude.

4) Nous continuons une étude multidisciplinaire dont le but est de mieux comprendre l'origine de l'anisotropie sismique observée dans les derniers 200 kilomètres du manteau, juste à la limite entre le manteau solide et le noyau de fer liquide. Cette étude en cours part du champ de déformation produit par un modèle géodynamique de plaque de subduction « tombant » au fond du manteau, et évalue plusieurs hypothèses sur la composition, les propriétés élastiques et les plans principaux de glissement des minéraux présents à ces profondeurs (Chandler *et al.*, 2018).

5) Enfin, j'ai été invitée à écrire deux courts articles de « News and Views » sur des articles publiés par d'autres. Le premier, dans *Nature*, concerne la question de la densité des grandes structures de vitesses sismiques lentes présentes dans les modèles de tomographie sismiques à la base du manteau, l'une sous l'océan Pacifique, l'autre sous l'Afrique. Ces structures sont-elles stables à l'échelle des temps géologiques, sont-elles plus ou moins denses que le manteau environnant (Romanowicz, 2017) ? Le deuxième N&V, publié dans *Nature Geosciences*, concerne le processus physique à l'origine des tremblements de terre de profondeur intermédiaire et grande (jusqu'à 700 km), alors qu'on ne s'attend pas à observer de ruptures cassantes aux fortes pressions et températures qui règnent à ces profondeurs (Romanowicz, 2018).

En 2018, j'ai été élue membre étranger de l'Académie des sciences de Pologne.

PUBLICATIONS

KARAOĞLU H. et ROMANOWICZ B., « Global seismic attenuation imaging using full-waveform inversion: A comparative assessment of different choices of misfit functionals », *Geophysical Journal International*, vol. 212, n° 2, 2018, p. 807-826, DOI : 10.1093/gji/ggx442.

ADAM J.M.-C., IBOURICHÈNE A. et ROMANOWICZ B., « Observation of core sensitive phases: Constraints on the velocity and attenuation profile in the vicinity of the inner-core boundary », *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, vol. 275, 2018, p. 19-31, DOI : 10.1016/j.pepi.2017.12.008.

ROY C. et ROMANOWICZ B.A., « On the implications of a-priori constraints in transdimensional Bayesian inversion for continental lithospheric layering », *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 122, n° 12, 2017, p. 10,118-10,131, DOI : 10.1002/2017JB014968.

FROST D.A. et ROMANOWICZ B., « Constraints on inner core anisotropy using array observations of P'P': Inner core anisotropy from P'P' », *Geophysical Research Letters*, vol. 44, n° 21, 2017, p. 10,878-10,886, DOI : 10.1002/2017GL075049.

ROMANOWICZ B., « Geophysics: The buoyancy of Earth's deep mantle », *Nature*, vol. 551, n° 7680, 2017, p. 308-309, DOI : 10.1038/551308a.

KARAOĞLU H. et ROMANOWICZ B., « Inferring global upper-mantle shear attenuation structure by waveform tomography using the spectral element method », *Geophysical Journal International*, vol. 213, n° 3, 2018, p. 1536-1558, DOI : 10.1093/gji/ggy030.

CLOUZET P., MASSON Y. et ROMANOWICZ B., « Box tomography: First application to the imaging of upper-mantle shear velocity and radial anisotropy structure beneath the North American continent », *Geophysical Journal International*, vol. 213, n° 3, 2018, p. 1849-1875, DOI : 10.1093/gji/ggy078.

IBOURICHENE A. et ROMANOWICZ B., « Detection of small scale heterogeneities at the inner core boundary », *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, vol. 281, 2018, p. 55-67, DOI : 10.1016/j.pepi.2018.03.003.

SMIT P.B., JANSSEN T.T., HERBERS T.H.C., TAIRA T. et ROMANOWICZ B.A., « Infragravity wave radiation across the shelf break », *Journal of Geophysical Research: Oceans*, vol. 123, n° 7, 2018, p. 4483-4490, DOI : 10.1029/2018JC013986.

ROMANOWICZ B., « A deep-earthquake puzzle resolved », *Nature Geoscience*, vol. 11, n° 9, 2018, p. 622, DOI : 10.1038/s41561-018-0197-2.

GARBER J.M., MAURYA S., HERNANDEZ J.-A., DUNCAN M.S., ZENG L., ZHANG H.L., FAUL U., MCCAMMON C., MONTAGNER J.-P., MORESI L., ROMANOWICZ B.A., RUDNICK R.L. et STIXRUDE L., « Multidisciplinary constraints on the abundance of diamond and eclogite in the cratonic lithosphere », *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, vol. 19, n° 7, 2018, p. 2062-2086, DOI : 10.1029/2018GC007534.

CHANDLER B.C., YUAN K., LI M., COTTAAR S., ROMANOWICZ B., TOMÉ C.N. et WENK H.R., « A refined approach to model anisotropy in the lowermost mantle », *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 375, n° 1, 2018, p. 012002, DOI : 10.1088/1757-899X/375/1/012002.

MASSON Y. et ROMANOWICZ B., « Box tomography: localized imaging of remote targets buried in an unknown medium, a step forward for understanding key structures in the deep Earth », *Geophysical Journal International*, vol. 211, n° 1, 2017, p. 141-163, DOI : 10.1093/gji/ggx141.

ROMANOWICZ B., HIRSCHMANN M., KELLOGG L., MANGA M., MUKHOPADHYAY S. et BUFFETT B., « Advancing Geoscience Research through CIDER », *GSA Today*, 2017, p. 60-61, DOI : 10.1130/GSATG329GW.1.

YUAN K. et ROMANOWICZ B., « Seismic evidence for partial melting at the root of major hot spot plumes », *Science*, vol. 357, n° 6349, 2017, p. 393-397, DOI : 10.1126/science.aan0760.