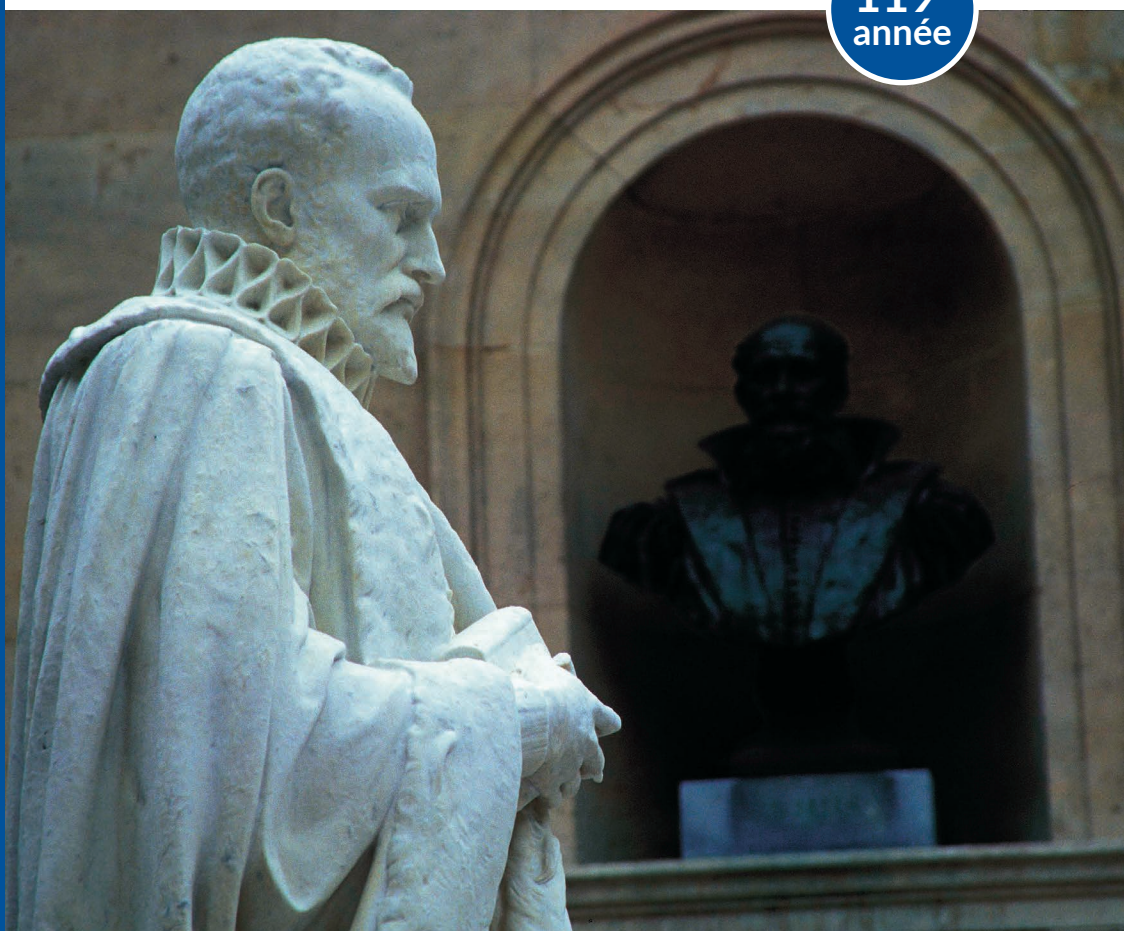


ANNUAIRE du **COLLÈGE DE FRANCE** 2018 - 2019

Résumé des cours et travaux

119^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

La série de cours « Les séismes profonds » est disponible, en audio et vidéo, sur le site du Collège de France (<https://www.college-de-france.fr/site/barbara-romanowicz/course-2018-2019.htm>), ainsi que le colloque « Intermediate and deep earthquakes: Observations and modeling » (<https://www.college-de-france.fr/site/barbara-romanowicz/symposium-2018-2019.htm>).

ENSEIGNEMENT

COURS – LES SÉISMES INTERMÉDIAIRES ET PROFONDS

Introduction

La plupart des séismes se produisent dans la croûte terrestre, à une profondeur de moins de 50 km. Ils sont dits « superficiels ». Cependant, dans certaines régions du globe, on observe des séismes à de plus grandes profondeurs, pouvant aller jusqu'à environ 680 km. On appelle ces séismes « intermédiaires » s'ils se produisent jusqu'à environ 300 km de profondeur, et « profonds » au-delà. Autant les roches sont cassantes à température et pression ambiantes, ce qui permet de comprendre la fracturation instantanée à l'origine des séismes superficiels, autant à plus grande profondeur, on s'attend à ce que la déformation, sous l'effet des forces tectoniques, se produise de façon plastique, sans engendrer de vibrations perceptibles. Comprendre les phénomènes physiques à l'origine des séismes profonds représente l'une des grandes questions de recherche actuelle en géophysique. Bien qu'en général non ressentis par les humains, les séismes profonds ont joué un rôle

important dans la révolution de la tectonique des plaques et dans la construction des premiers modèles de la structure interne de la terre. J'ai consacré à ce sujet fascinant quatre séances de cours de une heure et demie en octobre et novembre 2018.

Cours 1 – Introduction générale

J'ai tout d'abord montré que la plupart des séismes intermédiaires et profonds se produisent dans les « zones de subduction », zone de convergence de plaques tectoniques, où l'une des plaques (en général océanique) plonge sous l'autre. Les hypocentres de ces séismes s'alignent de façon remarquable suivant des surfaces planaires inclinées qui suivent le pendage de la plaque plongeante. La fréquence de ces séismes n'est pas distribuée de façon uniforme en fonction de la profondeur, avec un minimum autour de 300 km de profondeur, ce qui permet de distinguer les deux classes de séismes : intermédiaires et profonds. Les plus forts se produisent à des profondeurs supérieures à 600 km et peuvent atteindre des magnitudes supérieures à Mw 8 (magnitude de « moment », définie dans le cours). Le plus fort séisme enregistré de manière instrumentale (Mw 8.3) s'est produit récemment, le 24 mai 2013, sous la mer d'Okhotsk à l'ouest de la presqu'île du Kamchatka (Russie). Bien qu'en général inoffensifs, certains séismes de profondeur intermédiaire font des dégâts importants : c'est le cas par exemple en Roumanie, dans la zone de Vrancea, où des séismes de magnitude > 7 ont détruit une partie de la ville de Bucarest en 1940, puis de nouveau en 1977.

Au cours de cette séance, nous avons fait un tour du monde des zones de subduction et séismes profonds associés, tout autour de l'océan Pacifique, mais aussi en Europe : Sicile-Calabre, le long de l'arc hellénique, ou bien encore au sud de l'Espagne, y compris « un nid » de séismes profonds vers 650 km de profondeur, et en Asie centrale, en particulier dans la région de l'Hindu-Kush. Les séismes intermédiaires et profonds non associés en apparence à des zones de subduction se produisent cependant dans des zones de « convergence » et sont associés à des morceaux de manteau terrestre où la température est moins élevée que dans les régions avoisinantes, tel que cela est indiqué par imagerie sismique.

Après quelques rappels sur les deux types d'ondes sismiques, leurs caractéristiques et la façon moderne dont on les utilise pour localiser et déterminer la profondeur d'un séisme, nous avons retracé l'historique de la découverte des séismes profonds dans les années 1920 et le rôle important joué par Kiyoo Wadati (Japon). Celui-ci a imaginé une méthode géométrique originale pour déterminer l'épicentre et la profondeur des séismes, et a démontré l'existence de trois classes de séismes sous le Japon : superficiels, intermédiaires et profonds, classification retenue jusqu'à ce jour. Il a ensuite montré la présence de plans inclinés sur lesquels s'alignent les séismes non superficiels. Ces plans portent désormais le nom de « zones de Wadati-Benioff » – ce dernier, travaillant aux États-Unis, ayant contribué à proposer une explication physique pour l'existence de ces plans –, ils étaient à l'époque observés près de la limite entre l'océan et le continent.

Cours 2 – Processus physiques proposés et caractéristiques de la sismicité intermédiaire et profonde

Nous avons introduit les grandes lignes de la structure et de la minéralogie du manteau ainsi que les transitions de phases subies par l'olivine, constituant

majoritaire du manteau supérieur, aux profondeurs de 400 km et 660 km, sous l'effet des pressions et températures de plus en plus grandes, transitions détectées sismiquement par l'observation de « discontinuités » dans le profil des vitesses sismiques en fonction de la profondeur. Nous avons ensuite introduit la structure minéralogique et thermique d'une plaque lithosphérique, depuis sa formation dans une dorsale océanique jusqu'à son retour vers le manteau profond dans une zone de subduction.

Nous avons décrit le mécanisme de fracture invoqué pour expliquer les séismes superficiels, expliqué pourquoi un autre mécanisme est nécessaire pour produire les séismes profonds, et fait le tour des mécanismes proposés jusqu'à présent. Nous nous sommes attardés sur l'hypothèse avancée de la présence d'une langue d'olivine à l'état métastable à l'intérieur de la plaque plongeante pour expliquer les séismes profonds, en expliquant pourquoi cette hypothèse n'est pas universellement acceptée. Nous avons évoqué et illustré d'autres mécanismes proposés, y compris un mécanisme de déshydratation de la roche pour expliquer les séismes de profondeur intermédiaire.

Cours 3 – Séismes de profondeur intermédiaire et déshydratation de la croûte et de la lithosphère

Nous avons montré la présence de zones de Wadati-Benioff « doubles » dans la plupart des zones de subduction jusqu'à ~ 200 km de profondeur, et décrit les caractéristiques distinctes des séismes sur chacun des plans, l'un se trouvant dans la croûte de la plaque plongeante, l'autre, plus profond, dans le manteau. Nous avons introduit la notion de « paramètre thermique », produit de la vitesse verticale de la plaque et de son âge, et montré comment la profondeur maximale des séismes dans une zone de subduction donnée est liée à celui-ci. Nous avons introduit la « serpentinite », phase hydratée de l'olivine, l'antigorite, sa forme polymorphe stable à haute température, et le diagramme de déshydratation de celle-ci. Ceci nous a conduits à présenter les modèles pétrologiques proposés pour la plaque plongeante, et les observations sismiques à l'appui de la présence de croûte hydratée.

La deuxième partie de cette séance a été consacrée à montrer comment la plaque lithosphérique peut s'hydrater profondément au moment où elle se plie au niveau de la fosse océanique pour descendre dans le manteau ambiant. Des failles profondes s'ouvrent en extension, permettant à l'eau de pénétrer et d'être incorporée dans la roche au fur et à mesure de l'enfoncement de la plaque. Nous avons donné quelques exemples d'observations et de modélisation en imagerie sismologique, et, plus récemment, électro-magnétique, à l'appui de ce phénomène.

Cours 4 – Expériences de laboratoire

Après un rappel historique des premières expériences de laboratoire sur le comportement de la serpentine (années 1960) aux conditions à haute pression et haute température des zones de subduction, et sur l'apparition de cassure au moment de la déshydratation, ainsi que l'enregistrement d'émissions acoustiques au moment de la déshydratation (début des années 1990), nous avons présenté successivement les progrès dans l'instrumentation qui ont permis récemment d'étudier de façon plus précise ces phénomènes du point de vue expérimental. On arrive à l'heure actuelle à détecter et caractériser les sources d'émissions acoustiques, et à localiser dans le

temps et dans l'espace tout en faisant une cartographie des produits de déshydratation de la roche soumise à hautes pression et température dans des cellules à multi-enclumes. Les recherches actuelles tendent à suggérer que la production d'un « séisme » par déshydratation de la roche comprend plusieurs étapes, la déshydratation provoquant une instabilité mécanique dans la roche environnante, plutôt qu'étant la cause directe de la rupture. La sismologie met désormais en évidence la complexité de la rupture des séismes intermédiaires et profonds. Les recherches actuelles s'orientent vers une confrontation plus directe entre les observations sismiques et celles de laboratoire, rendues possible par l'évolution rapide des techniques dans ces deux domaines.

COLLOQUE – *INTERMEDIATE AND DEEP EARTHQUAKES: OBSERVATION AND MODELING*

Ce colloque, en langue anglaise, a eu lieu en salle Maurice Halbwachs les 19 et 20 novembre 2019. Il a rassemblé 19 intervenants invités venant de divers pays (Japon, États-Unis, Europe) et environ 90 participants. Chaque intervenant disposait de 30 min et de 5 min de questions. La première matinée a été consacrée aux observations sismologiques des sources sismiques, avec une session sur les séismes profonds et une autre sur les séismes intermédiaires, y compris une communication sur les séismes ayant lieu en dehors des zones de subduction, et en particulier sur la lune. Les sessions de l'après-midi ont porté sur les expériences de laboratoire et les fluides dans l'environnement des zones de subduction. Une session poster a suivi, où les étudiants des écoles doctorales inscrits au cours ont présenté leurs travaux de recherche.

Les intervenants de la matinée de la deuxième journée ont présenté des résultats récents d'imagerie sismique dans les zones de subduction, tandis que l'après-midi a été organisé autour de présentations sur les observations géologiques (microstructures) et le comportement des roches hydratées dans les expériences de laboratoire.

Le colloque s'est terminé par une discussion de plus d'une heure avec le public animée autour d'une table ronde. Le point a été fait sur les progrès récents et les limites de nos connaissances actuelles sur l'origine des séismes intermédiaires et profonds, en évoquant les questions encore ouvertes¹.

COURS À L'EXTÉRIEUR

J'ai passé 10 jours en janvier 2019 à l'université de la Colombie-Britannique (UBC, University of British Columbia, Vancouver, Canada), où j'ai donné :

1) une conférence grand public dans le cadre du Peter Wall Institute for Advanced Studies (PWIAS) sur le sujet : « Great earthquakes and tsunamis: Where, when and... how? ».

Cette conférence a fait le point sur nos connaissances actuelles en ce qui concerne la sismogénèse, les différents outils modernes d'observation (sismologie, géodésie, modélisation numérique) et les avancées récentes sur le déroulement de la rupture dans les séismes géants de zones de subduction, en particulier en liaison avec la

1. Le programme du colloque ainsi que les présentations orales peuvent être consultés sur la page web de Barbara Romanowicz, sur le site du Collège : <http://www.college-de-france.fr/site/en-barbara-romanowicz/symposium-2018-2019.htm>

génération de tsunami, et les autres phénomènes de tremors et glissements lents autour des zones probables de futurs grands séismes, en particulier en Colombie Britannique ;

2) une conférence au département de Sciences de la Terre de UBC : « Mantle plumes rooted at the core-mantle boundary: Evidence from seismic waveform tomography ».

Au cours de cette conférence, j'ai présenté les résultats récents sur l'imagerie des panaches mantelliques et leur relation avec le volcanisme de milieu de plaques tectoniques ;

3) un cours sur les séismes profonds, résumant les cours donnés au Collège à l'automne 2018, suivi d'un échange sur ce sujet avec le professeur Michael Bostock et son équipe.

RECHERCHE

Les recherches de mon équipe ont porté, d'une part, sur l'imagerie de la terre profonde, d'autre part, sur l'étude des sources du « bourdonnement » de la Terre. Ce dernier est un bruit de longue période dont l'origine est un processus en cascade faisant intervenir l'interaction entre elles des vagues océaniques provoquées par le vent, qui donne lieu à des vagues de plus longue période (vagues d'infragravité) et de l'interaction de celles-ci avec le fond marin, engendrant des ondes sismiques qui se propagent dans le manteau terrestre autour du globe. Nous avons mis au point une méthode qui a permis de raffiner la localisation en temps et en espace des sources sismiques de bourdonnement et leur relation avec les sources d'ondes d'infragravité [publications 1 et 6].

Pour ce qui est de l'imagerie sismique, nous continuons à développer de nouvelles méthodes de tomographie de forme d'onde du manteau terrestre, pour améliorer la résolution des structures tout en limitant la lourdeur des calculs sur ordinateur. Ces travaux sont en cours et non encore publiés. Nous avons par contre développé un nouveau modèle de la structure anisotrope de la graine solide de la terre [5] et de nouvelles analyses et interprétations de données sismiques sensibles à la structure de la graine sont en cours de rédaction. J'ai, en outre, participé à une étude de l'origine des anomalies isotopiques des laves de volcans de « points chauds » (volcans en milieu de plaque tectonique, par exemple Hawaï) dans une collaboration avec des géochimistes et un géodynamicien. Cette étude semble indiquer que ces anomalies proviennent de régions particulières du manteau inférieur et ne sont pas distribuées uniformément dans celui-ci [7].

PUBLICATIONS

[1] 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, <https://doi.org/10.1029/2018JC013986>.

[2] ROMANOWICZ B., « A deep-earthquake puzzle resolved », *Nature Geoscience*, vol. 11, n° 9, 2018, p. 622, <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0197-2>.

[3] 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 (G-Cubed)*, vol. 19, n° 7, 2018, p. 2062-2086, <https://doi.org/10.1029/2018GC007534>.

[4] 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 (ICOTOM-18)*, vol. 375, n° 1, 2018, 012002, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/375/1/012002>.

[5] FROST D.A. et ROMANOWICZ B., « On the orientation of the fast and slow directions of anisotropy in the deep inner core », *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, vol. 286, 2019, p. 101-110, <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2018.11.006>.

[6] MAURYA S., TAIRA T. et ROMANOWICZ B., « Location of seismic “Hum” sources following storms in the North Pacific Ocean », *Geochemistry, Geophysics, Geosystems (G-Cubed)*, vol. 20, n° 3, 2019, p. 1454-1467, <https://doi.org/10.1029/2018GC008112>.

[7] WILLIAMS C.D., MUKHOPADHYAY S., RUDOLPH M. et ROMANOWICZ B.A., « Primitive helium is sourced from seismically slow regions in the lowermost mantle », *Geochemistry, Geophysics, Geosystems (G-Cubed)*, vol. 20, n° 8, 2019, p. 4130-4145, <https://doi.org/10.1029/2019GC008437>.

Autres publications

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, <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2018.03.003>.

ROMANOWICZ B. et BILLEN M., « Louise H. Kellogg 1959-2019 », *Eos*, vol. 100, 2019, <https://doi.org/10.1029/2019EO127207>.

ROMANOWICZ B. et YUAN H. (dir.), *Lithospheric discontinuities*, Washington, American geophysical union, coll. « Geophysical Monograph Series », vol. 239, 2019, <https://doi.org/10.1002/9781119249740>.

ROMANOWICZ B. et YUAN H., « Introduction », in B. ROMANOWICZ et H. YUAN (dir.), *Lithospheric Discontinuities*, Washington, American geophysical union, coll. « Geophysical Monograph Series », vol. 239, 2019, p. 1-4, <https://doi.org/10.1002/9781119249740.ch0>.