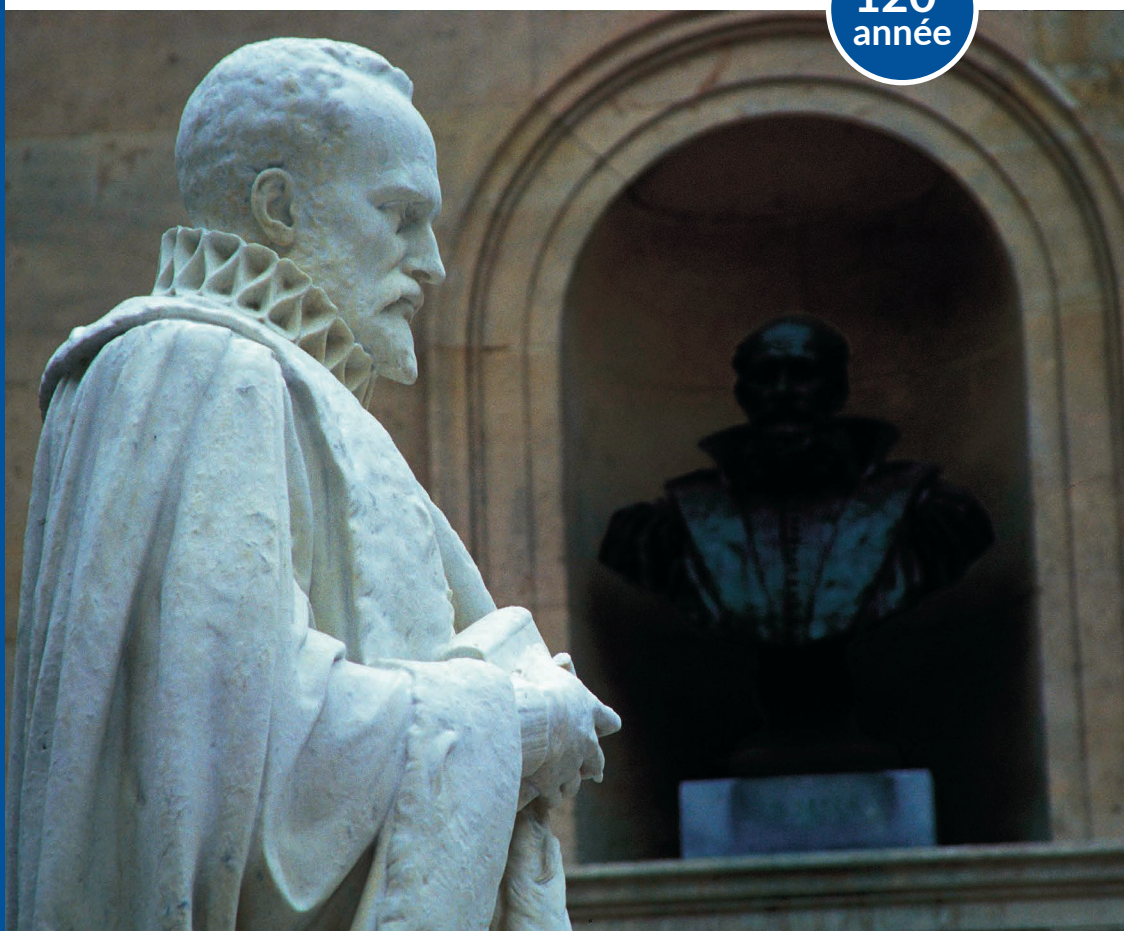


ANNUAIRE du **COLLÈGE DE FRANCE** 2019 - 2020

Résumé des cours et travaux

120^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 : imagerie sismique, terre profonde, tomographie sismique

La série de cours « Physique de l'intérieur de la Terre » est disponible, en audio et en vidéo, sur le site internet du Collège de France (<https://www.college-de-france.fr/site/barbara-romanowicz/course-2019-2020.htm>).

ENSEIGNEMENT

COURS – IMAGERIE SISMIQUE DE LA TERRE PROFONDE

Cette série de cinq cours a porté sur les méthodes d'imagerie sismique, telles que développées depuis environ quarante ans pour l'étude de la structure profonde globale du manteau de la terre. Le principe est similaire à celui de l'imagerie médicale : comment obtenir une image de la structure interne d'un corps en disposant des sources et des capteurs d'ondes à sa surface ?

Au premier ordre et à une très bonne approximation, la terre est constituée de couches sphériques concentriques, si bien qu'on peut décrire la structure élastique de son manteau solide (depuis la surface jusqu'à 2 900 km de profondeur) en faisant intervenir un seul paramètre – la profondeur. Cependant, il existe des variations géographiques de température et de composition dues au fait que notre planète est « dynamique ». En particulier, pour dégager la chaleur interne emmagasinée dans le noyau et le manteau, le manteau est animé de mouvements de convection – certes très lents (de l'ordre de 10 km/Ma), qui se manifestent en surface par les mouvements des plaques tectoniques. Les ondes sismiques engendrées par un fort séisme se propagent à travers l'intérieur de la terre, à des vitesses qui varient au cours de la propagation et

dépendent des propriétés élastiques des matériaux rencontrés en chemin, qui elles-mêmes dépendent de la température et de la composition de ces roches. Grâce à la tomographie sismique, combinée avec les informations provenant d'autres disciplines (physique des matériaux, géochimie, modélisation géodynamique), nous avons une idée de plus en plus précise de la morphologie de ces courants de convection mantellique, ce qui nous permet de mieux comprendre les observations de surface et leur variation avec le temps : distribution des continents, séismes et des volcans, des chaînes de montagnes (ou dorsales) submergées au fond des océans, etc., ainsi que de l'évolution de la Terre depuis sa formation il y a environ 4,6 milliards d'années.

Cours 1 – Introduction

Le premier cours a présenté un rappel succinct sur l'équation des ondes et ses solutions dans un milieu élastique isotrope ou anisotrope, ainsi que les différents types d'ondes sismiques, et la théorie des rais, qui permet de suivre le trajet des ondes de haute fréquence dans un modèle de terre. Nous avons introduit le concept de modèle global de référence (« 1D ») ainsi que le principe de la tomographie sismique, qui repose avant tout sur la mesure des temps de parcours des différentes ondes sismiques et le calcul des différences – ou résidus – entre les temps mesurés et les temps calculés dans un modèle de terre existant (le plus précis possible). Disposant d'un ensemble de trajets qui illuminent le manteau ou une de ses parties dans différentes directions, l'ensemble de ces résidus sont ensuite rétropropagés pour déterminer la localisation, forme et amplitude des anomalies de structure élastique. Nous avons posé le système d'équations correspondantes et introduit les notions de « problème direct » et « problème inverse ».

Cours 2 – Tomographie des temps de parcours téléseismiques (Travel time tomography)

Continuant au cours de la deuxième séance, nous avons établi progressivement les éléments essentiels pour la construction de modèles tomographiques du manteau de la terre : types de données, niveau d'approximation de la théorie de propagation des ondes, paramétrisation physique et géométrique du modèle, méthode d'inversion employée pour obtenir un modèle. Nous avons présenté les techniques employées dans la construction des premiers modèles tomographiques de la fin des années 1970, et les premières découvertes auxquelles ils ont donné lieu. Parmi ces découvertes, confirmées au cours des décennies qui ont suivi, notons la mise en évidence d'une morphologie très particulière à la base du manteau, qui ne ressemble pas à celle des premiers ~ 200 km depuis la surface (cette dernière reflète bien la distribution des plaques tectoniques) : deux régions aux températures particulièrement élevées localisées de manière antipodale, l'une sous l'océan Pacifique et l'autre sous l'Afrique, baptisées faute de mieux « LLSVP » (*large low shear velocity provinces*). Nous avons montré que les progrès de la tomographie « classique » de temps de parcours, dans les dernières décennies, nous a permis avant tout d'obtenir des images de plus en plus précises des régions froides à grande profondeur. Celles-ci délimitent principalement les plaques tectoniques qui retombent dans le manteau dans les zones de subduction (surtout autour du Pacifique). Une découverte récente est la réalisation que ces plaques ne s'enfoncent pas de manière régulière jusqu'au fond du manteau, mais s'étalent horizontalement sur des milliers de kilomètres, à 660 km ou ~ 1 000 km de profondeur.

Cours 3 – Tomographie des temps de parcours des ondes de volume P (ou S) téléseismiques (*Travel time tomography*)

Continuant à la troisième séance, nous avons montré comment on explique l'étalement à 660 km par la présence d'une transition de phase cristalline dans le minéral principal du manteau supérieur, l'olivine, à cette profondeur. Cette transition de phase à pente de Clapeyron négative freine en effet la pénétration des plaques dans le manteau plus profond. Par contre, on n'a pas d'explication bien établie jusqu'à présent pour l'étalement de ces plaques à 1 000 km de profondeur.

Les progrès dans la résolution des images ont permis, depuis une quinzaine d'années, de combiner quantitativement les images tomographiques des morceaux de plaques tectoniques identifiés comme tels dans le manteau profond (par leurs modules de compression et de cisaillement indiquant une température inférieure à la moyenne) avec les reconstructions géologiques des positions des plaques. L'objectif était de prolonger dans le passé l'histoire de la subduction, en montrant en particulier que les plaques arrivées actuellement au fond du manteau datent d'environ 300 Ma, ce qui renseigne sur la vitesse moyenne de l'écoulement de matière dans le manteau profond.

L'approximation de fréquence infinie sous-jacente à la théorie des rais est une bonne approximation pour le parcours des ondes dans les parties froides du manteau (ou les vitesses de propagation locales sont plus rapides que dans les régions avoisinantes). Par contre, cette approximation, qui repose sur la mesure du temps d'arrivée du tout début de l'onde, empêche de « voir » les régions plus chaudes. Dans cette troisième séance, nous avons ainsi introduit les progrès théoriques dans l'interprétation des temps de parcours des ondes téléseismiques, avec l'introduction de noyaux de sensibilité « de fréquence finie », qui ont permis d'obtenir les premières images fiables des panaches mantelliques chauds, qui remontent des profondeurs du manteau et dont l'expression de surface est un volcan de « point chaud », comme celui de Hawaï, situé en milieu de plaque tectonique. Ces images, fondées seulement sur un petit nombre de types d'ondes sismiques (principalement les « ondes P ») ne permettent cependant pas à elles seules d'obtenir une bonne résolution de ces panaches, à cause de l'absence d'illumination de la structure profonde sous les océans.

Cours 4 – Tomographie « de forme d'onde »

Nous avons introduit un autre type d'ondes sismiques, les ondes de surface, qui permettent de compléter l'illumination du manteau supérieur sous les océans. Lors de la quatrième séance, nous avons illustré quelques découvertes faites grâce à l'imagerie à partir des ondes de surface, qui se propagent le long de la surface de la terre, échantillonnent des profondeurs de plus en plus grandes suivant leur période, ce qui se manifeste par des vitesses de propagation qui dépendent de la fréquence. Une première observation notable est la dépendance de la structure en fonction de l'âge de la plaque océanique, une autre, la variation de la structure anisotrope qui permet de cartographier l'épaisseur de la lithosphère, aussi bien dans les océans que dans les continents, ainsi que la direction actuelle et ancienne du mouvement des plaques.

Au cours de cette quatrième séance, nous avons montré comment, en combinant les données de dispersion d'ondes de surface (mode fondamental et harmoniques) et de temps de parcours d'ondes de volume, on a pu construire des modèles à grande échelle des variations de la structure globale du manteau de plus en plus précis, en

nous attardant sur les LLSVP dont l'origine énigmatique ne cesse de nous intriguer : elles ont des bords abrupts, ce qui exclut une interprétation en termes de variations purement thermiques, et présentent moins d'anisotropie que l'anneau de structure plus froide qui les entourent. Les débats sur leur nature et leur rôle dans la convection mantellique font rage : sont-elles un réservoir de matière primordiale (non touchée par la convection depuis l'époque de la formation de la Terre), ou bien sont-elles constituées de matière « recyclée » provenant des plaques de subduction ? Sont-elles plus denses ou moins denses que les régions voisines ? Quelle hauteur atteignent-elles au-dessus de la limite noyau-manteau ? Sont-elles des structures compactes ou bien représentent-elles des bouquets de panaches mantelliques ?

Pour pouvoir affiner encore plus les images tomographiques et trancher sur ces débats, de nouveaux outils sont nécessaires, pour compenser l'illumination très imparfaite que procurent les petites parties des enregistrements sismiques utilisées « classiquement » en imagerie globale (temps de parcours des ondes P et S, et dispersion des ondes de surface). C'est ainsi que s'est développée progressivement une méthodologie qui tente d'exploiter toute l'information contenue dans les enregistrements, avec, comme but, d'interpréter l'ensemble de la « forme d'onde », qui contient non seulement les ondes qui se propagent « directement » entre la source et la station, mais de nombreuses ondes qui se réfléchissent et se réfractent à la surface et à la limite noyau-manteau, ainsi qu'aux discontinuités de structure internes du manteau et qui permettent ainsi une illumination des structures à plus haute résolution spatiale.

Cours 5 – Tomographie « de forme d'onde » : nouvelles images du manteau terrestre

Nous avons ainsi décrit la technique d'inversion de la forme d'onde et ses défis en sismologie globale, en continuant pendant la cinquième séance de cours. Cette méthodologie nécessite des outils sophistiqués pour le calcul du champ des ondes dans le milieu hétérogène qu'est le manteau terrestre. Introduite dès les années 1980, et développée au cours des années 1990 en s'appuyant, pour le calcul du champ des ondes, sur la théorie des modes propres de la terre et ses approximations au 1^{er} ordre, elle bénéficie depuis une quinzaine d'années d'outils numériques performants (la méthode « des éléments spectraux »), qui remplacent les calculs approximatifs fondés sur les modes propres. Associée à des bases de données d'enregistrements sismiques large bande de plus en plus complètes, la méthode d'inversion de la forme d'onde complète a déjà permis de découvrir un ensemble de colonnes « lentes » (indiquant des températures de plusieurs centaines de degrés, plus élevées que le manteau environnant), ancrées à la base du manteau dans les LLSVP, orientées verticalement et s'étendant à travers le manteau inférieur à proximité géographique de volcans de points chauds. Ces structures, plus larges que celles qui sont attendues pour des panaches purement thermiques, doivent aussi comporter un élément compositionnel. Certaines d'entre elles renferment, à leur base, des « ULVZ » (*ultra low velocity zones*), structures de faible hauteur et de quelques centaines de kilomètres de diamètre, présentant des anomalies de propriétés élastiques extrêmes, qui sont détectées par modélisation directe de la forme d'ondes diffractées sur la limite manteau solide/noyau liquide.

Après avoir illustré ces résultats récents, et donc présenté l'état actuel de l'imagerie du manteau profond, nous avons consacré la fin de la cinquième séance aux

techniques d'imagerie de la croûte terrestre, ce qui nous a permis de présenter, très rapidement, une technique introduite il y a seulement quinze ans, celle de la tomographie du bruit sismique (*ambient noise tomography*). Celle-ci repose sur les principes de l'interférométrie appliquée en générale à des paires de stations d'enregistrement et exploite la présence de bruit de fond sismique engendré de manière continue non par des séismes, mais par l'interaction du vent avec la surface des océans. Cette dernière interaction engendre à son tour des vagues qui interagissent avec les fonds marins produisant ainsi des sources d'énergie sismique. Cette technique permet de s'affranchir des contraintes dues à la distribution très peu uniforme des séismes, et est actuellement utilisée abondamment pour obtenir des modèles de haute résolution de la croûte continentale dans les régions pourvues de réseaux sismiques denses, en exploitant le signal correspondant aux ondes de surface. Elle progresse rapidement à l'heure actuelle, pour s'étendre aux ondes de volume et atteindre des structures à plus grande profondeur.

COLLOQUE – GLOBAL SCALE SEISMIC IMAGING AND DYNAMICS OF THE EARTH'S MANTLE

Ce colloque international, initialement prévu les 26 et 27 mars 2020, a été repoussé, une première fois aux 17-18 novembre 2020 et une deuxième fois aux 15-16 avril 2021. Il a finalement eu lieu les 7-8 octobre 2021. Son programme, les enregistrements des présentations et les supports visuels correspondants sont disponibles sur le site du Collège¹.

RECHERCHE

Dans le cadre de ma chaire, j'ai bénéficié d'un poste d'ATER, qui a permis à Mathurin Wamba, travaillant sous ma direction et celle du professeur J.-P. Montagner à l'IPG de Paris, de terminer et soutenir (le 10 juillet 2020) sa thèse de doctorat, intitulée : « Tomography of Indian Ocean by waveform inversion ». Dans cette thèse, M. Wamba a adapté et appliqué les outils de tomographie de forme d'onde complète au cas du manteau (jusqu'à 1 000 km de profondeur) sous l'océan Indien, avec attention particulière à la « racine » du point chaud de la Réunion. Il a en effet profité de données non seulement de réseaux permanents ou temporaires sur terre, mais aussi provenant de la campagne internationale d'acquisition de données large bande sismiques « fond de mer RHUM-RUM » autour de ce point chaud. Il a pu mettre en évidence le panache mantellique correspondant jusque dans le manteau inférieur. Depuis sa soutenance, il a continué ce travail en rajoutant des données qui illuminent les parties les plus profondes de cette région, et a pu préciser la morphologie des panaches mantelliques de la Réunion et des îles Comores et Marion jusqu'à la base du manteau. Ce travail a donné lieu à deux articles : l'un publié en 2021 (Wamba *et al.*, 2021) et l'autre en cours de révision pour la revue *Science Advances*.

Pendant l'année 2019-2020, j'ai collaboré sur plusieurs autres projets de recherche : étude de l'anisotropie sismique (Frost et Romanowicz, 2019 ; Frost *et al.*,

1. <https://www.college-de-france.fr/agenda/colloque/global-scale-seismic-imaging-and-dynamics-of-the-earth-mantle>

2020) et de la densité (Robson *et al.*, 2020) de la graine solide de la terre, recherche de la source des anomalies isotopiques des volcans de points chauds par modélisation géodynamique fondée sur le modèle tomographique global le plus récent de notre équipe (Williams *et al.*, 2019) et localisation des sources du « bourdonnement sismique » de longue période, engendré dans l’océan Pacifique par interaction des vagues dites « d’infragravité » avec le fond océanique, principalement au niveau du plateau continental sur la côte ouest de l’Amérique du Nord (Maurya *et al.*, 2019). J’ai également pu terminer la phase de « preuve de concept » d’une méthode de calcul du champ des ondes sismiques en milieu hétérogène qui permet d’accélérer les calculs numériques très lourds correspondant, en réduisant ce calcul, habituellement réalisé séparément pour chaque séisme, à un seul calcul pour un ensemble de sources sismiques (Romanowicz *et al.*, 2019).

Notamment, un article de vulgarisation sur la tomographie sismique globale du manteau pour la revue *La Recherche*, préparé depuis longtemps, a pu enfin voir le jour (Romanowicz, 2020).

PUBLICATIONS

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

MAURYA S., TAIRA T. et ROMANOWICZ B., « Location of seismic “hum” sources following storms in the north Pacific ocean », *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, vol. 20, n° 3, 2019, p. 1454-1467, <https://doi.org/10.1029/2018GC008112>.

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*, vol. 20, n° 8, 2019, p. 4130-4145, <https://doi.org/10.1029/2019GC008437>.

ROMANOWICZ B., CHEN L-W et FRENCH S.W., « Accelerating full waveform inversion via source stacking and cross-correlations », *Geophys. J. Int.*, vol. 220, n° 1, 2019, p. 308-322, <https://doi.org/10.1093/gji/ggz437>.

ROBSON A et ROMANOWICZ B., « New normal mode constraints on bulk inner core velocities and density Research Paper », *Phys. Earth Planet. Inter.*, vol. 295, 2019, art. 106310, <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2019.106310>.

FROST D.A., ROMANOWICZ B. et ROECKER S., « Upper mantle slab under Alaska: contribution to anomalous core-phase observations on South-Sandwich to Alaska path », *Phys. Earth. Planet. Inter.*, vol. 299, 2020, art. 106427, <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2020.106427>.

WAMBA M., MONTAGNER J.P., ROMANOWICZ B. et BARRUOL G., « High-resolution tomography of the Indian Ocean around La Réunion hotspot », *J. Geophys. Res.*, vol. 126, n° 8, 2021, e2020JB021490, <https://doi.org/10.1029/2020JB021490>, [hal-03384274].

ARTICLE DE VULGARISATION

ROMANOWICZ B., « Les panaches font de la résistance », *La Recherche*, n° 563, 2020, p. 88-92.