

Physique de l'intérieur de la Terre

M^{me} Barbara ROMANOWICZ, professeur

ENSEIGNEMENT

Cours : Structure et évolution du manteau profond de la Terre

1^{er} octobre – 12 novembre 2012 (6 cours de 1 h 30 chacun)^a

Cours 1 : Introduction

Nous avons commencé par une introduction historique détaillant les étapes principales dans la construction du modèle moyen de la Terre, modèle à symétrie sphérique en « pelures d'oignon », avec sa croûte et son manteau solides et constitués de silicates, son noyau liquide (Oldham, 1906) formé de fer allié avec 10 % d'éléments légers et sa graine solide, formée de fer plus pur. Ce modèle moyen, construit en combinant les informations provenant des mesures sismologiques, confrontées aux expériences de physique des matériaux à haute pression et température, donne une image statique de l'intérieur de la Terre. Les phénomènes observés en surface, tremblements de terre et éruptions volcaniques, indiquent cependant que l'intérieur de la Terre n'est pas figé, et on accepte volontiers de nos jours que le manteau de la Terre est animé de mouvements de convection, servant à évacuer la chaleur primordiale (refroidissement de la Terre au cours des temps géologiques) et celle produite par les éléments radioactifs. Ces courants de convection sont le moteur de la tectonique des plaques, mais nous ne connaissons pas encore en détail leur morphologie.

Nous avons rappelé les principaux outils sismologiques (mesure des temps de propagation et des amplitudes des ondes de volume de type P et S, des ondes de surface, fréquences des vibrations propres), la façon dont on détecte sismiquement les discontinuités dans le manteau, en particulier les discontinuités du manteau

a. Les supports de cours et les vidéos sont disponibles sur le site Internet du Collège de France : <http://www.college-de-france.fr/site/barbara-romanowicz/course-2012-2013.htm> [Ndlr].

supérieur à 400 km, 520 km et 660 km de profondeur, liées aux changements de phase dans l'olivine, qui constitue plus de 50 % de la composition du manteau.

Nous avons présenté les principaux outils de l'étude des matériaux terrestres aux pressions et températures du manteau, outils expérimentaux tels la cellule de diamant à chauffage laser, ou la cellule multi-enclume. Avant d'aborder la structure du manteau profond, nous avons présenté un résumé des connaissances récentes sur la « zone de transition » du manteau, zone où ont lieu les principaux changements de phase. Nous avons introduit le modèle pyrolitique de la composition du manteau, basé sur les observations de laves volcaniques éruptées dans les rides océaniques. Nous avons mentionné l'influence de l'eau sur ces transitions de phase, sachant que la quantité d'eau contenue dans le manteau n'est pas connue de manière précise.

Nous avons ensuite abordé la composition du manteau inférieur, formé en majeure partie de pérovskite de magnésium et de fer $(\text{Mg, Fe})\text{SiO}_3$, avec une proportion d'environ 20 % d'oxydes (ferropériclase $(\text{Fe, Mg})\text{O}$). Nous avons mentionné la découverte, en 2004, de la transition de phase pérovskite → post-pérovskite dans la pérovskite magnésique, qui aurait lieu à des pressions et températures correspondant à une profondeur dans le manteau d'environ 200 km au-dessus de la limite noyau-manteau. À cette profondeur, une discontinuité sismique a été observée dans plusieurs régions du monde. Nous y reviendrons.

Nous avons décrit nos connaissances sur le profil moyen de température dans la Terre, appelé « géotherme », contraint par 1) les mesures près de la surface, 2) les pentes de Clapeyron des transitions de phase du manteau supérieur, et la limite noyau externe/graine, et 3) l'hypothèse d'adiabaticité associée à la présence de convection dans la majeure partie du manteau (sauf les couches limites où le transfert de chaleur se fait par conduction, près de la surface et de la limite noyau-manteau), et dans le noyau externe fluide. Des incertitudes considérables demeurent sur le saut de température à la limite manteau-noyau (CMB) et sur la température de fusion du fer aux pressions correspondant à la limite de la graine.

Pour finir, nous avons rappelé nos connaissances sur la rhéologie dans le manteau et le profil moyen de viscosité, contraint par les mesures de gravité et les variations temporelles de l'altitude dans certaines régions continentales, dues au rebond postglaciaire. Des variations importantes de viscosité sont présentes dues à l'influence de la température et autres paramètres physiques sur celle-ci. Les incertitudes sur le profil de viscosité dans le manteau sont importantes, mais on sait que celle-ci augmente avec la profondeur, avec une différence de l'ordre d'un facteur 30 entre le manteau supérieur (les premiers 660 km de profondeur) et le manteau inférieur.

Cours 2 : Les grands enjeux de la tomographie sismique

En très bonne première approximation, la structure de la Terre est constituée de couches sphériques concentriques, et est décrite par un modèle « 1D », où les variations de toutes les propriétés ne dépendent que de la profondeur (ou du rayon). Comme nous l'avons dit précédemment, ce modèle de Terre « statique » ne rend pas compte des phénomènes dynamiques, telle la convection mantellique, qui introduisent des « variations latérales » par rapport au modèle 1D. Pour décrire plus précisément l'intérieur de la Terre il faut donc considérer un modèle à trois dimensions, 3D (variations avec la profondeur mais aussi avec la position horizontale).

La tectonique des plaques définit une circulation mantellique globale avec écoulements ascendants de matière chaude sous les rides océaniques, et écoulements descendants de matière froide dans les zones de subduction. Cependant, certaines observations ne cadrent pas avec ce modèle simple, en particulier la présence de volcanisme intra-plaque (les fameux « points chauds » et les « *trapps* » continentaux que l'on pense être alimentés par des « panaches » mantelliennes). Leur origine donne lieu à plusieurs questions fondamentales : 1) À quelle profondeur se trouve la source des panaches mantelliennes (660 km, CMB) ? 2) cette source représente-t-elle un réservoir « primordial » de composition différente de celle des basaltes recueillis dans les rides médio-océaniques ; 3) l'imagerie de ces panaches pourrait-elle nous permettre de déterminer la proportion de chaleur dégagée par radioactivité dans le manteau par rapport à celle correspondant au refroidissement de la Terre ?

Plus généralement, nous avons passé en revue les différentes sources possibles d'hétérogénéité à l'intérieur du manteau terrestre. Ceci nous a mené à décrire les méthodes de détermination de la composition de la Terre, par comparaison des échantillons de roches avec la composition des météorites, et à faire le bilan thermique de la Terre.

Nous avons ensuite abordé la question de la communication entre le manteau supérieur et le manteau inférieur et le rôle de la discontinuité de 660 km.

Pour finir, nous avons rappelé les principes de la tomographie sismique, les différents types de données sismiques utilisées et les difficultés rencontrées, par contraste avec la tomographie médicale, par la distribution non uniforme des sources et des stations.

Cours 3 : Les super-panaches ou LLSVP

Nous avons présenté dans ses grandes lignes la structure tridimensionnelle du manteau de la Terre, telle qu'elle nous apparaît dans les modèles tomographiques d'ondes S, contrastant la structure à 100 km de profondeur, qui reflète la tectonique de surface, avec celle plus profonde, qui fait d'abord apparaître les plaques plongeantes en prolongement des zones de subduction (entre 400 et 670 km de profondeur), puis une structure à plus courte échelle dans le milieu du manteau, et pour finir, de nouveau une structure dominée par les grandes longueurs d'onde, lorsqu'on s'approche de la CMB (vers 2500-2800 km de profondeur). On observe aussi une augmentation de l'amplitude des variations latérales lorsqu'on s'approche de la CMB. Cette structure remarquable près de la CMB s'organise en deux zones quasi-équatoriales et antipodales de vitesses de cisaillement inférieures à la moyenne globale, entourées d'un anneau de vitesses plus rapides. La structure est dominée par une composante de « degré 2 », orientée de façon correspondante à une configuration stable des moments d'inertie de la Terre. Les deux zones lentes sont connues sous le nom de LLSVP (*Large Low Shear Velocity Provinces*) et parfois elles sont aussi surnommées « méga-panaches ». Leur nature (thermique/compositionnelle ?) et leur rôle dans la dynamique globale ne sont pas encore bien compris. On constate une asymétrie dans le profil des vitesses de cisaillement avec la profondeur, entre les LLSVP, où le gradient de vitesse est très marqué près de la CMB, et les régions de vitesse rapide qui les entourent, et où la vitesse augmente modérément avec la profondeur. Ceci est une indication possible d'une composante compositionnelle de ces structures. Une autre observation qui appuie la notion de composition distincte est le caractère très abrupt des bords des LLSVPs. Certains

auteurs ont proposé que les LLSVPs seraient plus denses que les régions avoisinantes, sur la base d'observations de modes propres, mais ce résultat reste controversé.

D'autre part, la structure à la base du manteau est corrélée, dans ses plus grandes longueurs d'onde avec, d'une part la distribution des plaques plongeantes dans le manteau supérieur, et d'autre part, la structure en atténuation dans la zone de transition et la distribution des points chauds en surface, ce qui indique qu'il y a bien une composante thermique aux vitesses de cisaillement lentes des LLSVPs.

Deux scénarios contrastés sont proposés pour expliquer la présence des LLSVPs : ce sont soit des « réservoirs géochimiques » de matière primordiale, datant de l'époque où un océan de magma était présent dans une grande partie du manteau, soit la manifestation d'hétérogénéité compositionnelle et thermique introduite par les plaques tombées au fond du manteau.

Nous avons également décrit les observations qui ont conduit à la détection d'une discontinuité environ 200 km au-dessus de la CMB dans certaines régions, qui correspondent en général à des zones en dehors des LLSVPs. Il s'agit principalement d'observations de précurseurs aux ondes réfléchies sur la CMB, de type S (ScS) ou P (PcP), faites au moyen de réseaux sismiques régionaux. La discontinuité est plus franche en S (saut de vitesse de ~ 3 %) qu'en P (saut de 1 %) et se produit sur une distance verticale de moins de 70 km. Le saut en densité est plus difficile à contraindre et en général les observations de discontinuité en S et en P ne sont pas corrélées, ce qui est surprenant. Cependant, la réalité de cette discontinuité a été confortée récemment (2004) par la découverte, indépendante, de la transition de phase pérovskite → post-pérovskite (Pv → pPv), faite simultanément de manière expérimentale et par des calculs théoriques. Si la discontinuité sismique correspond effectivement à cette transition de phase, cela apportera dans un avenir proche des contraintes très précises sur la température à la base du manteau.

Cours 4 : Structure fine à la base du manteau

Dans la continuité du cours 3, nous avons présenté les différentes étapes dans l'étude de la transformation Pv → pPv dans la pérovskite magnésique depuis sa découverte en 2004 jusqu'aux résultats les plus récents. Les controverses actuelles se concentrent autour des effets de composition non-homogène (ajout d'aluminium et de fer) sur la pente de Clapeyron de la transition (et donc sa position dans le manteau ou le noyau), et sur l'épaisseur de cette transition. Les derniers travaux de physique des matériaux considèrent des compositions minéralogiques plus réalistes, telles le modèle de pyrolite, ou celui des basaltes des rides médio-océaniques (MORB). Il semblerait que pour que cette transition soit observée aux profondeurs du manteau, une composition proche de celle issue des zones de subduction (MORB et harzburgite) soit nécessaire, mais de grandes incertitudes subsistent encore sur les résultats expérimentaux.

Dans la deuxième partie de cette leçon, nous avons abordé la question de l'observation d'anisotropie sismique à la base du manteau et de son interprétation. Après une introduction brève de la notion d'anisotropie sismique et de son interprétation (anisotropie intrinsèque et extrinsèque; anisotropie radiale et azimutale), nous avons montré quelques exemples d'observation dans le manteau supérieur, où ce phénomène peut être aisément compris dans le cadre de la dynamique associée à la tectonique des plaques. Nous avons introduit la notion de biréfringence des ondes de volume, et son observation aussi bien dans le manteau supérieur que

dans la zone D'' à la base du manteau, où l'on détecte principalement la composante d'anisotropie radiale à l'aide des mesures de biréfringence des ondes S diffractées sur la CMB. La distribution à grande échelle de l'anisotropie radiale semble corrélée avec celle des vitesses sismiques. L'interprétation est rendue difficile par le peu de connaissances sur le régime de déformation dominant aux pressions et températures correspondantes. Sachant que la post-pérovskite semble être beaucoup plus anisotrope que la pérovskite, plusieurs groupes se livrent actuellement à des exercices de calcul d'anisotropie sismique en fonction de la structure cristalline des composants principaux de la zone D», des systèmes de glissement associés et du champ de déformation qui résulte de la dynamique du manteau.

Cours 5 : Structure fine à la base du manteau, ULVZ

Dans la première partie de ce cours, nous avons terminé la présentation commencée dans le 4^e cours sur nos connaissances actuelles permettant de prédire à partir de la dynamique et de la physique des matériaux, l'anisotropie sismique, et de la confronter avec les observations sismiques. Cet exercice permet d'écarter certains modèles de structure cristalline proposés pour la post-pérovskite, dans l'hypothèse où celle-ci serait effectivement présente à la base du manteau.

Dans la deuxième partie de ce cours, nous avons abordé la notion d'ULVZ (*Ultra Low Velocity Zone*). Ces structures remarquables de faible étendue géographique et de faible hauteur au-dessus de la CMB (20-30 km) ont été découvertes à la base du manteau il y a vingt ans. Elles sont caractérisées par des réductions de vitesse de compression très importantes (plus de 10 %). Deux interprétations possibles ont été proposées : 1) présence de fusion partielle ; 2) enrichissement en fer sous forme d'un alliage métallique. Dans les deux cas, la réduction prédite des vitesses de cisaillement atteint ~ 30 %, et l'augmentation de densité pourrait atteindre 10 %. L'interprétation des données sismiques comprend cependant des *trade-offs* importants. Ces ULVZ semblent être détectées de manière préférentielle dans les régions des LLSVP, et il y aurait une corrélation possible avec la distribution en surface des points chauds. Nous avons dans mon équipe mis en évidence une ULVZ de forme à peu près circulaire et de taille particulièrement importante (diamètre ~ 800 km), située presque à la verticale du point chaud de Hawaï, à la bordure nord de la LLSVP pacifique. Pour déterminer la nature des ULVZ, il faudrait pouvoir mieux contraindre leur densité, un défi particulièrement difficile pour les sismologues. En attendant, les physiciens des matériaux se penchent sur l'origine possible des concentrations de fer (à l'état solide ou en fusion partielle) que pourraient contenir ces ULVZ.

Cours 6 : Dynamique du manteau profond

Ce cours a été consacré aux considérations géodynamiques permettant le maintien à la base du manteau de zones telles les ULVZ. Les questions posées sont, en particulier :

- La convection mantellique est-elle assez vigoureuse pour maintenir de manière dynamique des petites ULVZ plus denses que le manteau ambiant sans former de couche uniforme dense à la base du manteau ?
- Comment éviter l'entraînement des ULVZ dans le manteau ambiant ?

– Quel est l'effet des plaques de subduction accumulées dans la D» sur la forme des LLSVP et la distribution géographique des ULVZ ?

Les géodynamiciens proposent des modèles de convection en 2D à haute résolution (de l'ordre du kilomètre à la CMB), avec trois compositions différentes (LLSVP, ULVZ, manteau ambiant). Les ULVZ sont introduites initialement sous la forme d'une couche homogène sur la CMB. Ils résolvent numériquement les équations de conservation de masse, moment cinétique et énergie dans l'approximation de Boussinesq (manteau incompressible), avec une viscosité qui dépend de la température, et introduisent des traceurs pour repérer le champ compositionnel. Ils montrent que si le contraste de densité entre les ULVZ et le manteau ambiant est d'au moins 5 %, des ULVZ peuvent se former à la base du manteau et restent en bordure des LLSVP. Ces calculs en 2D ont été récemment étendus en 3D. Ces modèles arrivent également à reproduire le caractère abrupt des bords des LLSVPs.

Pour finir, nous avons évoqué la question de la présence possible, tôt dans l'histoire de la Terre, d'un océan de magma, couche stable de fluide dense suivie de cristallisation fractionnée lente qui aurait pu former des dômes de composition particulière correspondant aux LLSVP observés sismiquement à l'heure actuelle.

Séminaire : *Structure, composition and dynamics of the deep mantle*

Ce séminaire, organisé sous la forme d'un colloque international par le Pr Barbara Romanowicz (Chaire de Physique de l'intérieur de la Terre) et le Pr Guillaume Fiquet (IMPMC/UPMC) s'est tenu au Collège de France les 13-14 novembre 2012^b. Il a réuni 24 conférenciers et panelistes invités, spécialistes de différentes disciplines au sein des sciences de la Terre pour faire le point sur les résultats théoriques, expérimentaux et observationnels récents conduisant au progrès dans la compréhension des caractéristiques physiques et chimiques actuelles du manteau profond et de son évolution à l'échelle de temps géologiques. Une centaine de personnes ont participé à ce colloque.

La première journée a été suivie d'une session posters, où une quinzaine d'étudiants doctorants de plusieurs écoles doctorales en géophysique (IPGP, ENS, Paris-Sud Orsay), inscrits au cours, ainsi que d'autres écoles doctorales européennes, ont présenté un résumé des recherches actuelles sur un thème de leur choix lié au manteau profond, ou sur leur propre recherche, si celle-ci concerne ce sujet général. Cette session poster a eu beaucoup de succès et a permis des discussions prolongées entre les conférenciers invités, les jeunes chercheurs et les autres participants.

La deuxième journée s'est terminée par une discussion générale autour d'un panel représentant les différentes disciplines des géosciences qui contribuent à l'étude de la structure, dynamique et évolution du manteau profond. Notamment ont été débattus : la possibilité ou non de fusion partielle à la base du manteau, les incertitudes sur la transition de phase post-pérovskite, les caractéristiques de l'océan magmatique ancien, et le modèle chondritique de composition de la Terre.

b. Les supports de cours et les vidéos de ce séminaire sont disponibles sur le site Internet du Collège de France : <http://www.college-de-france.fr/site/barbara-romanowicz/seminar-2012-2013.htm> [Ndlr].

Autres activités d'enseignement

À l'automne 2012, j'ai lancé un séminaire hebdomadaire de lecture critique d'articles de recherche sur le même thème que celui de mon cours au Collège de France et en liaison avec lui. Ce séminaire pluridisciplinaire, ouvert à tous les chercheurs intéressés de la région parisienne, s'est tenu à l'IPGP de Paris, les vendredis de 13h30 à 14h30. Les présentations (en général deux articles par séance) étaient faites en priorité par les étudiants de l'école STEP qui ont pu comptabiliser ce séminaire, conjointement avec le cours du Collège de France comme unité de cours en vue de leur doctorat.

J'ai également continué à piloter le programme CIDER (*Cooperative Institute for Dynamic Earth Research*) et fait partie du comité d'organisation d'un colloque : « *CIDER Post-AGU workshop* », le 10 décembre 2013 à Berkeley, et de l'école d'été CIDER qui se tient du 7 juillet au 2 août 2013 également à Berkeley (<http://www.deep-earth.org/summer13.shtml>).

RECHERCHE

Mon équipe de recherche comprend actuellement six post-docs et un étudiant doctorant basés à l'IPG de Paris, dont deux nouveaux arrivés en février et mars 2013, financés par une ERC Senior « Wavetomo » ainsi que trois étudiants doctorants et deux post-docs basés à l'université de Californie, Berkeley, financés aux États-Unis.

Yder Masson (post-doctorant IPGP) travaille sur la théorie et l'application à l'échelle continentale de méthodes adjointes numériques pour la propagation des ondes sismiques. En particulier, il a mis au point une méthode de miroirs virtuels, permettant de restreindre à une partie de l'espace considéré l'inversion numérique de la forme d'onde. Ce travail a donné lieu à un article soumis récemment pour publication (Masson *et al.*, 2013). Ce travail continue et doit donner lieu bientôt à des applications concrètes dans le cadre de l'étude de la structure du manteau profond. Il a également terminé l'implémentation rigoureuse de l'atténuation dans l'inversion par méthodes adjointes. Il a présenté ce travail à l'EGU d'avril 2013.

Jamie Barron (Post-doc, IPGP) travaille depuis deux ans sur la construction d'un modèle tomographique globale d'atténuation des ondes sismiques S, en partant d'un modèle élastique construit dans mon équipe à Berkeley à partir de la forme d'onde complète et en utilisant la méthode des éléments spectraux. Après des difficultés théoriques et de programmation, il vient de terminer les premiers tests synthétiques concluants, et devrait obtenir un modèle basé sur des données réelles d'ici la fin de l'été 2013. Ce travail a été présenté à l'AGU de décembre 2012.

Sergi Ventosa (Post-doc, IPGP) est un spécialiste du traitement de signal dans le domaine de la géophysique appliquée. Il travaille sur l'adaptation des méthodes qu'il a développé au cours d'un post-doc à l'IFP au cas de la sismologie globale, avec pour but la détection de l'onde PKJKP et la mesure des temps et amplitudes des ondes PcP et ScS (ondes réfléchies sur la limite noyau-manteau) et des phases associées. Au cours de l'année passée, il a démontré l'efficacité de sa méthode pour l'extraction des formes d'ondes PcP, et a développé une carte précise des anomalies de temps d'arrivée de ces ondes, qui nous renseignent sur la structure à la base du manteau. Il a présenté son travail à l'AGU de décembre 2012 (Ventosa *et al.*, 2012).

Il collabore également avec Zhao Zheng (doctorant à Berkeley) sur la mise en valeur des précurseurs aux ondes SS qui échantillonnent les discontinuités du manteau supérieur. Ce dernier travail a été présenté à la conférence de la *Seismological Society of America* en avril 2013 (Zheng *et al.*, 2013).

Matthias Meschede (doctorant, IPGP) finit sa deuxième année de thèse dans l'ED109 sur la question de la mesure de l'atténuation en cisaillement dans le manteau de la Terre en présence d'hétérogénéités latérales, en utilisant des données de vibrations propres (ondes stationnaires) et d'ondes de surface (ondes progressives). On a constaté dans le passé des différences de l'ordre de 20 % dans les mesures du facteur de qualité Q_β selon le type de mesures. Matthias a commencé par des tests synthétiques basés sur des calculs numériques de propagation des ondes sismiques par la méthode des éléments spectraux (SEM). Il a en particulier montré que, hormis la question de la représentation précise des effets de gravité dans la méthode SEM, le calcul SEM représente de manière exacte les effets de propagation longue période sur des longues durées (jusqu'à 100 h de temps), à condition que le *mesh* et le pas d'échantillonnage SEM soient suffisamment fins. Ceci est nécessaire pour le calcul numérique des vibrations propres de la Terre. Récemment, il a construit un ensemble de modèles de Terre dont les grandes longueurs d'onde sont basées sur les modèles tomographiques récents, et dont les courtes longueurs d'onde sont obtenues par prolongation stochastique en préservant une continuité de plusieurs mesures statistiques (spectres, rugosité...). Il calcul des sismogrammes synthétiques de longue durée dans ces modèles par la méthode SEM : la confrontation des caractéristiques spectro-temporelles de ces synthétiques avec les observations réelles permettra d'apporter des contraintes sur la nature de la diffusion dans le manteau terrestre. Ce travail a été en partie présenté à l'AGU de décembre 2012 (Meschede *et al.*, 2012). Un article est en préparation.

Joanne Adam (post-doc, IPGP) est arrivée dans l'équipe en février 2013 après un doctorat à l'université de Dublin sur la structure régionale de la lithosphère sous l'Afrique du Sud. Elle change complètement de sujet et s'initie à la problématique de la structure et de l'anisotropie de la graine solide.

Florian Rickers (post-doc, IPGP) est arrivé dans l'équipe en mars 2013 après avoir terminé sa thèse de doctorat à l'université d'Utrecht. C'est un spécialiste de tomographie par méthodes adjointes, et il a commencé à construire un modèle du manteau profond sous l'océan Pacifique dans le but d'essayer de résoudre la morphologie des panaches mantelliques sous-jacents aux points chauds du « *superswell* » (Tahiti, îles Marquises...) dans le Pacifique équatorial.

L'équipe parisienne collabore avec l'équipe de Berkeley dans la mesure où cette dernière transfère peu à peu son savoir-faire en modélisation et inversion, ainsi qu'en traitement de données aux post-docs parisiens. Notamment, le programme de modélisation de la structure élastique du manteau supérieur par la méthode SEM (Scott French, doctorant à Berkeley en collaboration avec Ved Lekic, professeur assistant à l'université du Maryland, ancien doctorant dans mon équipe) a fourni en particulier les outils nécessaires à Jamie Barron pour la modélisation de l'atténuation. Les outils de méthode adjointe mis au point par Yder Masson ont été incorporés au programme d'inversion de forme d'onde à l'échelle continentale développé depuis cinq ans à Berkeley avec Huaiyu Yuan (chercheur), afin de construire un modèle de lithosphère de plus haute résolution, en y ajoutant également des éléments d'inversion « trans-dimensionnelle » en collaboration avec Thomas Bodin, Miller

post-doc à Berkeley. Le travail de l'équipe de Berkeley est naturellement plus avancé et a donné lieu à plusieurs publications au cours de l'année passée.

Pour développer l'esprit d'équipe internationale, j'anime depuis septembre 2011 des discussions de groupe hebdomadaires au moyen de visio-conférences entre Paris et Berkeley. Nous collaborons également avec Jean Paul Montagner, de l'IPG de Paris, Yann Capdeville de l'université de Nantes et Paul Cupillard de l'ENSG, Nancy.

PUBLICATIONS

Cottaar S. et Romanowicz B., « An unusually large ULVZ at the base of the mantle near Hawaii », *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 355-356, 2012, 213-222.

Durand S., Matas J., Ford S., Ricard Y., Romanowicz B., Montagner J.-P., « Insights from ScS measurements on deep mantle attenuation », *Earth Planet. Sci. Lett.*, 374, 2013, 101-110.

Lekic V., Cottaar S., Dziewonski A. et Romanowicz B., « Cluster analysis of global lower mantle tomography : a new class of structure and implications for chemical heterogeneity », *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 357-358, 2012, 68-77.

Montagner J.P., Larmat C., Capdeville Y., Fink M., Phung H., Romanowicz B., Clévédy E. et Kawakatsu H., « Time-reversal method and cross-correlation techniques by normal mode theory : a three-point problem », *Geophys. J. Int.*, 191, 2012, 637-652.

Zheng Z. et Romanowicz B., « Do double "SS precursors" mean double discontinuities ? », *Geophys. J. Int.*, 191, 2012, 1361-1373.

Publications sous presse ou soumises

Bodin T., Yuan et Romanowicz B., « Inversion of receiver functions without deconvolution : application to the Indian Craton », *Geophys. J. Int.*, à paraître, 2013.

Cottaar S. et Romanowicz B., « Observations of changing anisotropy across the southern margin of the African LLSVP », *Geophys. J. Int.*, à paraître, 2013.

French S., Lekic V. et Romanowicz B., « Waveform tomography reveals channeled flow at the base of the oceanic asthenosphere », *Science*, à paraître, 2013.

Masson Y., Cupillard P., Capdeville Y. et Romanowicz B., « On the numerical implementation of time-reversal mirrors for tomographic imaging », *Geophys. J. Int.*, à paraître, 2013.

Taira T., Zheng Z. et Romanowicz B., « On the Systematic Long Period Noise Reduction on Ocean Floor Broadband Seismic Sensors Collocated with Differential Pressure Gauges », *Bull. Seism. Soc. Amer.*, à paraître, 2013.

Yuan H., French S., Cupillard P. et Romanowicz B., « Shear wave velocity model of eastern North America upper mantle using full waveform tomography », *Earth Planet. Sci. Lett.*, soumis, 2013.

CONFÉRENCES ET PRÉSENTATIONS INVITÉES

Séminaires invités

« Seismic tomography based on numerical wavefield computations : inferences on viscous fingering in the oceanic upper mantle », *Univ. de Munich*, octobre 2012.

« Inferences on global dynamics from upper mantle tomography based on numerical seismic wavefield computations », *ETH Zurich*, 11 octobre 2012.

« Channeled flow at the base of the oceanic lithosphere : evidence from full waveform tomography », *Princeton Univ.*, 24 février 2013.

« Imag(in)ing the Earth's Interior », Univ. of California Berkeley, *Distinguished Faculty Research Lecture*, 30 avril 2013.

« L'imagerie sismique du manteau terrestre », *Société française de physique*, Marseille, 2 juillet 2013.

Workshops

Présentations à l'American Geophysical Union de décembre 2012 à San Francisco

Barron J., Lekic V., French S. et Romanowicz B., « Towards a global 3D upper mantle attenuation model using SEM », 2013.

Bodin T., Yuan H. et Romanowicz B., « Inversion of Receiver functions without deconvolution », 2013.

Cottaar S., Li M., Miyagi L., McNamara A.L. et Romanowicz B., « Forward modeling the perovskite-postperovskite transition in seismically anisotropic models beneath a slab », (DI007 session, *invited*), 2013.

Cottaar S. et Romanowicz B., « Observations on rotation of flow near LLSVP boundaries », (DI001 session), 2013.

French S., Lekic V. et Romanowicz B., « Spectral-element global waveform tomography : a second-generation upper-mantle model », 2013.

Guinois N., Zheng Z., Taira T. et Romanowicz B., « Near real-time noise removal for the Monterey Ocean Bottom Broadband (MOBB) seismic station data », 2013.

Meschede M. et Romanowicz B., « On the discrepancy in measurement of Q using surface waves and normal modes », 2013.

Romanowicz B., French S. et Lekic V., « Low velocities in the oceanic upper mantle and their relations to plumes : new insights from SEM-based waveform tomography », *invited*, 2013.

Ventosa S. et Romanowicz B., « On improving the measurement of differential travel times and amplitudes of phases sensitive to the deep mantle », 2013.

Yuan H. et Romanowicz B., « Azimuthal anisotropy layering and plate motion in the Pacific Ocean », 2013.

Zheng Z. et Romanowicz B., « Detection of the Lehmann discontinuity across the Pacific by SS precursors recorded at USArray », 2013.

Présentations à la Seismological Society of America, Salt Lake City, avril 2013

Zheng Z., Ventosa S. et Romanowicz B., « Application of local adaptive slant-stack transform (LSST) to improve the SS precursor record sections recorded on the USArray », 2013.

Taira T., Zheng Z. et Romanowicz B., « On the Systematic Long Period Noise Reduction on Ocean Floor Broadband Seismic Sensors Collocated with Differential Pressure Gauges », 2013.

Présentation à l'EGU, Vienne, avril 2013

Masson Y. et Romanowicz B., « A hybrid method for the computation of quasi-3D seismograms », 2013.

Participation à l'organisation d'un workshop sur la construction d'un modèle de Terre de référence, Univ. du Maryland, 24-25 mai 2013.

RESPONSABILITÉS DIVERSES

Membre, Conseil d'établissement, Collège de France.

Membre, Advisory committee, COMPRES program.

Présidente, section 16, National Academy of Sciences (États-Unis).

Comité de recrutement d'un professeur de Géophysique à l'université de Lyon 1 (avril-juin 2013).

Membre, jury de thèse de doctorat, Stéphanie Durand, ENS Lyon, 26 octobre 2013.

Présidente, jury de thèse de doctorat, Sanne Cottaar, UC Berkeley, 6 mai 2013.

Membre, Conseil scientifique du programme GEOSCOPE.

Comité de sélection, Arthur Holmes Medal, European Geophysical Union.

Membre, review panel du programme INSIGHT, IPGP, 27 mai 2013.

Chair, 2013 Gordon Conference on the Interior of the Earth, Mt Holyoke College, 2-7 juin 2013.

Organisation d'un colloque, le 8 décembre 2012, dans le cadre du programme CIDER (Cooperative Institute on Dynamic Earth Research), pour préparer le programme de l'été 2013 de CIDER sur le sujet : « Continental Lithosphere : formation, evolution, destruction ». Ce colloque s'est tenu à Berkeley à la suite de la conférence annuelle de l'AGU, le 10 décembre 2012 à San Francisco.