



La terre profonde en 3D : contributions à l'imagerie sismique de notre planète

par **Barbara ROMANOWICZ**, Membre élue dans la discipline « Sciences de l'univers »

Les ondes élastiques émises par les tremblements de terre, s'ils sont assez forts, se propagent à travers l'intérieur du globe et en illuminent la structure, de la surface jusqu'en son centre. Grâce à leur observation, nous connaissons relativement bien, depuis plus de 50 ans, la structure moyenne en pelure d'oignons de notre planète, avec sa croûte, son manteau formés de roches silicatées, son noyau de fer liquide et sa graine solide constituée de fer encore plus pur.

Cependant, la structure en couches concentriques de notre planète nous fournit une image "statique" de son intérieur, une image figée dans le temps. Ce qui nous intéresse avant tout à l'heure actuelle, c'est de cartographier l'expression de la dynamique interne, c'est à dire des courants de convection -certes très lents - de l'ordre de quelques cm/an - qui évacuent la chaleur interne et entraînent le mouvement des plaques tectoniques en surface et donc les tremblements de terre et les éruptions volcaniques. Ces courants de convection (passés ou présents d'ailleurs) se manifestent par des variations dites "latérales" de la structure du manteau: les régions de courants montants, moins denses et plus chaudes, vont ralentir les ondes sismiques qui les traversent, par contre les régions de courants descendants, correspondant à la matière qui s'est refroidie en montant et à l'approche de la surface, vont accélérer la propagation de ces ondes.

Pour déterminer ces variations latérales, on fait appel à l'imagerie sismique, ou tomographie, dont le principe est similaire aux techniques utilisées en médecine: on envoie à travers un corps opaque à la vision directe, des ondes (ici ondes sismiques) engendrées à la surface de celui-ci par des sources de vibration (ici les séismes) et on les enregistre également en surface, par des capteurs d'onde appropriés. On peut mesurer leurs temps de parcours ou leurs amplitudes, et confronter ceux-ci avec les temps ou amplitudes calculés dans un modèle de référence, généralement un modèle moyen du globe à symétrie sphérique, c'est à dire un modèle simplifié où les paramètres physiques ne varient qu'en fonction de la profondeur.

L'imagerie sismique est incontestablement la méthode la plus performante pour "voir" à l'intérieur de la terre. Elle a pour outil les ondes élastiques émises par les tremblements de terre partout dans le monde et enregistrées par des capteurs d'ondes, ou sismomètres, très sensibles, capables de détecter des déplacements de l'ordre du micron, qui proviennent de séismes de magnitude supérieure à 5, dans le monde entier. Ces ondes illuminent l'intérieur du globe: d'une part, comme la lumière, elles se réfléchissent, ou se réfractent sur les obstacles rencontrés, elles accélèrent ou ralentissent suivant la nature et l'état de la matière traversée. En combinant les enregistrements de nombreux séismes dans de nombreuses stations tout autour du globe, on peut réaliser, par des méthodes dites tomographiques, des images en trois dimensions de l'intérieur de la terre. A la différence des méthodes médicales, la richesse du champ des ondes sismiques provient de l'existence de deux types d'ondes, les ondes de compression et de cisaillement, ainsi que de leur aptitude à détecter l'anisotropie, c'est à dire les variations de propriétés des roches en fonction de la direction de l'écoulement, passé (fossilisé) ou présent. En revanche, nous ne contrôlons pas la distribution des sources (çad des séismes), situées en grande majorité le long des bordures des plaques tectoniques, et nous sommes aussi fortement limités dans la distribution des stations: deux tiers de la surface du globe sont couvertes par l'océan, et les îles sont relativement peu nombreuses. De plus, l'installation de stations sismiques de qualité en fond de mer représente encore des difficultés considérables d'ordre technologique et financier.



Il est donc nécessaire de développer des techniques sophistiquées pour extraire le plus d'information possible des enregistrements sismiques, et c'est à ce niveau là que se situe un des axes principaux de la recherche dans mon équipe.

La tomographie dite "classique", développée depuis environ 30 ans, exploite uniquement une partie de l'information contenue dans les enregistrements sismiques: les temps de propagation d'un petit nombre d'arrivées d'ondes, celles qui se distinguent bien sur les enregistrements par leur séparation dans le temps - par exemple le mode fondamental des ondes de surface, ou les premières arrivées d'ondes de compression (P) ou de cisaillement (S). Ce type de tomographie nous a certes permis de mettre en évidence un certain nombre de structures importantes dans le manteau: le fait, par exemple, que, dans la partie superficielle du manteau (les premiers 200-300 km), la structure reflète la tectonique globale: le lieu de formation de croûte nouvelle le long des dorsales au fond des océans est marqué par des vitesses plus lentes que la moyenne, reflétant le dégagement de la chaleur provenant des grandes profondeurs, alors que les vieux continents, qui correspondent aux parties les plus épaisses de la lithosphère, sont comme on s'y attend, plus froides, marquées par des vitesses de propagation des ondes rapides. Les études tomographiques qui ont eu sans doute le plus de succès, sont les études régionales dans les zones de subduction, où l'illumination est particulièrement bonne grâce aux nombreuses stations du côté continental, et aux nombreux séismes qui se produisent depuis la surface jusqu'à 700 km de profondeur dans ces régions.

Une des questions fondamentales de la géophysique interne est celle de savoir si la convection mantellique affecte le manteau sur toute son épaisseur, ou seulement sa partie supérieure, celle située au-dessus de la "discontinuité de 660 km", une discontinuité qui correspond à une transition de phase dans le système de l'olivine, un des minéraux principaux dont est constitué le manteau. Cette discontinuité est sans doute aussi une discontinuité rhéologique, dans le sens où la viscosité (qui contrôle la facilité avec laquelle le manteau se déforme) augmente d'un facteur ~ 100 au passage entre le manteau supérieur et le manteau plus profond. On pourrait s'attendre à ce que les plaques en subduction rencontrent de la résistance à l'approche de cette limite structurelle et demeurent dans le manteau supérieur. Or, ces images tomographiques ont montré, certes, que ceci se produit dans certaines régions, mais de manière globale, on trouve des comportements variés, et en particulier des endroits - en Amérique centrale ou dans le sud-ouest Pacifique - où l'on peut suivre ces plaques jusqu'au moins la moitié de la profondeur du manteau, ce qui montre que, d'une certaine façon, le manteau inférieur participe à la circulation globale.

La découverte la plus étonnante des modèles tomographiques dits de 1^e génération fut la présence d'une structure à grande échelle très particulière dans les derniers ~ 500 km du manteau, tout près du noyau: deux grandes zones de vitesse de cisaillement relativement faible, centrées sur l'équateur et placées de manière antipodale, l'une sous l'océan pacifique, l'autre sous l'Afrique. D'autres observations indiquent que ces structures ne sont pas seulement d'origine thermique, mais comportent une composante compositionnelle. Cependant, on ne connaît toujours pas leur nature, ni leur rôle dans la convection globale du manteau: sont-elles des structures anciennes, passives, balayées à la base du manteau par les plaques qui y tombent, ou bien, au contraire, jouent-elles un rôle déterminant de contrôle de la convection? Il a aussi été montré que la plupart des volcans de "points chauds" se trouvent au-dessus de ces deux zones - ces volcans, comme par exemple Hawaii, situés en milieu de plaque, n'ont pas d'explication dans la théorie de la tectonique des plaques classique, et l'on pense qu'ils sont l'aboutissement en surface de "panaches mantelliques", enracinés profondément dans une couche limite pour la convection thermique - tels qu'on les observe dans la convection de Rayleigh-Bénard.



L'une des questions qui motivent le développement de techniques plus avancées d'imagerie sismique est précisément de pouvoir découvrir la morphologie de ces panaches mantelliques, ce qui apporterait des contraintes importantes sur la forme de la convection, sur le budget thermique de la terre ainsi que sur le rôle des variations de composition chimique dans la dynamique. On s'intéresse aussi bien sûr à préciser le couplage entre la circulation à grande échelle dans le manteau, manifestée par les courants montants sous les dorsales et les courants descendants dans les zones de subduction, et le mouvement des plaques tectoniques, couplage qui doit se manifester par des écoulements à plus petite échelle, voire locaux.

Les progrès récents en imagerie sismique vont de pair avec les améliorations dans la qualité des capteurs sismiques, la possibilité d'enregistrer de manière numérique des quantités de plus en plus importantes de données, et la construction d'archives numériques de très grand volume et d'accès complètement libre et immédiat. Encore plus récemment, dans les cinq dernières années, ce sont les progrès théoriques de la simulation numérique du champ des ondes sismiques dans les milieux complexes à trois dimensions, et le développement de moyens de calcul puissants pour la simulation des ondes ou l'inversion des matrices de grande dimension, qui permettent enfin la réalisation de modèles de terre en trois dimensions de résolution de plus en plus fine, grâce à l'exploitation de l'information contenue dans l'enregistrement tout entier d'un séisme, ce qu'on appelle la tomographie par forme d'onde - par opposition avec celle qui n'utilise que les temps de parcours d'un petit nombre d'arrivées d'énergie facilement identifiables. Ces nouvelles méthodes s'avèrent particulièrement utiles pour détecter et caractériser les régions qui ralentissent les ondes sismiques, c'est à dire justement les régions de courants ascendants.

C'est ainsi que dans mon équipe, nous avons récemment développé et progressivement perfectionné une technique originale de tomographie à grande échelle par forme d'onde, ce qui nous a permis de construire, pour la première fois, des images tri-dimensionnelles globales du manteau, d'abord dans sa moitié supérieure, et maintenant dans sa totalité, avec une résolution considérablement plus fine. Ces images ont permis de mettre en évidence, d'une part, dans le manteau supérieur et dans les bassins océaniques aussi bien du Pacifique, de l'Atlantique et de l'Océan Indien, la présence de structures "lentes", allongées dans la direction absolue du mouvement de la plaque tectonique qui les surplombe et que l'on peut suivre sur des milliers de kilomètres. Ces "rouleaux" d'orientation horizontales, larges de 800 à 1000 kilomètres, sont en plus espacés de manière plus ou moins périodique. Bien que leur interprétation reste encore à préciser, ils représentent sans doute une forme de convection secondaire, qui serait ainsi cartographiée pour la première fois. A plus grande profondeur, cette disposition préférentiellement horizontale des structures fait place à un nombre limité de colonnes d'orientation plutôt verticale et de diamètre assez important (également de l'ordre du millier de kilomètres), présentes de manière continue dans le manteau entier et encrées à sa base. Ces colonnes - pour ne pas dire panaches - assez droites dans le manteau inférieur, ondulent dans le manteau supérieur, comme si l'écoulement qu'elles représentent était entraîné par la circulation plus vigoureuse dans le manteau supérieur, moins visqueux. Leur prolongation verticale près de la surface aboutit au voisinage des volcans de "points chauds" les plus actifs. Les panaches mantelliques existeraient donc bien, et seraient issus de la couche limite du manteau au voisinage du noyau - mais le fait le plus important, c'est qu'ils seraient de l'ordre de 5 fois plus larges que ne le prédit la théorie classique des panaches dans un fluide chauffé par le bas. Nous n'en sommes actuellement qu'au début de la réflexion sur leur nature, mais dès à présent, on peut dire qu'ils sont soit très "vieux", qu'ils existent depuis plusieurs centaines de millions d'années, soit de composition différente du manteau environnant.



Pour conclure, je dirai que l'imagerie sismique connaît actuellement un renouveau considérable grâce aux nouvelles méthodes de modélisation et à l'accumulation de données sismiques large bande de grande qualité. Ceci n'est qu'un début, car il y a d'autres développements récents dont je n'ai pas parlé, tels l'installation de réseaux sismiques denses et de grande envergure qui, couplés avec les progrès dans la méthodologie du traitement de signal de réseau, commencent à produire des images localement encore plus précises, ou tels l'exploitation du bruit de fond pour l'illumination des structures. Enfin, je n'ai parlé que du manteau terrestre, tous ces outils nouveaux s'appliquent également à l'étude de la graine de fer solide, cette région mystérieuse au centre de la terre, qui contrôle la dynamique du noyau et donc l'évolution du champ magnétique terrestre, et dont la structure complexe n'a pas fini de nous offrir des surprises.