



Un profil continental:
cette illustration
présente les variations
du relief (ligne blanche)
de la croûte
sud-américaine

Pourquoi la terre tremble-t-elle au Brésil

Des sismologues proposent une nouvelle explication aux tremblements de terre dans le pays

Igor Zolnerkevic et Ricardo Zorzetto

PUBLIÉ EN MAI 2013

Le 8 octobre 2010, la terre a tremblé comme on le l'avait jamais vu à Mara Rosa, ville de 10 mille habitants située au nord de l'état de Goiás. Il était 5 heures de l'après midi passées ce vendredi là et les personnes se préparaient pour le week-end quand le sol s'est mis à balancer si intensément qu'il était impossible de tenir debout. Les arbres ont été secoués, les murs se sont fissurés et des tuiles sont tombées des toitures. Moins d'une minute plus tard, l'onde de choc de ce séisme de magnitude 5, l'un des plus forts enregistrés dans le pays au cours de ces 30 dernières années, avait parcouru 250 kilomètres et atteint Brasília où certains bâtiments ont dû être évacués. «Beaucoup de personnes vivant à Mara Rosa ont pensé que la terre allait s'ouvrir et que c'était la fin du monde», raconte Lucas Barros, chef de l'Observatoire Sismologique de l'Université de Brasilia (UnB). Au cours des semaines suivantes, Lucas Barros et son équipe ont installé des sismographes à Mara Rosa et dans les communes voisines pour mesurer la réverbération de ce tremblement de terre. En six mois, 800 autres secousses sismiques moins intenses ont eu lieu au même endroit et ont permis de déterminer la cause directe de l'agitation terrestre dans cette région. Bien en dessous de Mara Rosa, à trois kilomètres de profondeur, il y a une longue fissure de la croûte terrestre, couche la plus rigide et externe de la planète. Tout au long de cette cassure, qui s'étend sur 5 kilomètres, les roches s'étaient fracturées, faisant trembler la terre. «Nous avons dû réaliser des réunions publiques à Mara Rosa et à Mutunópolis pour expliquer aux

gens ce qui se passait et ce qu'ils devaient faire pour se protéger», déclare Lucas Barros.

La découverte de cette fracture n'a pas surpris le groupe de l'UnB. Mara Rosa et les autres communes situées au nord de l'état de Goiás et au sud de l'état du Tocantins se trouvent dans une région géologiquement instable, connue sous le nom de zone sismique Goiás-Tocantins et qui concentre 10% des tremblements de terre au Brésil. Une partie des géologues a attribué cette fréquence élevée de tremblements de terre dans cette région (l'une des neuf zones sismiques délimitées au Brésil et s'étendant sur 700 kilomètres de long et 200 kilomètres de large) à sa proximité du Trans Linéament brésilien, une longue cicatrice de la croûte terrestre qui traverse le Brésil et qui, de l'autre côté de l'Atlantique, continue en Afrique. On estime que la croûte terrestre est plus fragile le long de ce linéament car elle concentrerait des blocs rocheux fissurés qui par compression se rompraient plus facilement, produisant plus facilement des tremblements de terre.

Mais cette théorie ne fait pas l'unanimité car souvent la localisation des tremblements de terre ne coïncide pas avec cet ensemble de failles et on n'a jamais détecté de séismes sur certains de ses segments. Ceux qui doutent de l'influence directe du linéament sur les secousses sismiques de cette région misent sur des causes plus profondes comme celles qui viennent d'être découvertes par un groupe de chercheurs de l'Institut d'Astronomie de Géophysique et de Sciences Atmosphériques (IAG) de l'Université de São Paulo (USP) à partir d'un relevé récemment conclu sur l'épaisseur de la croûte terrestre brésilienne.

Sous la terre

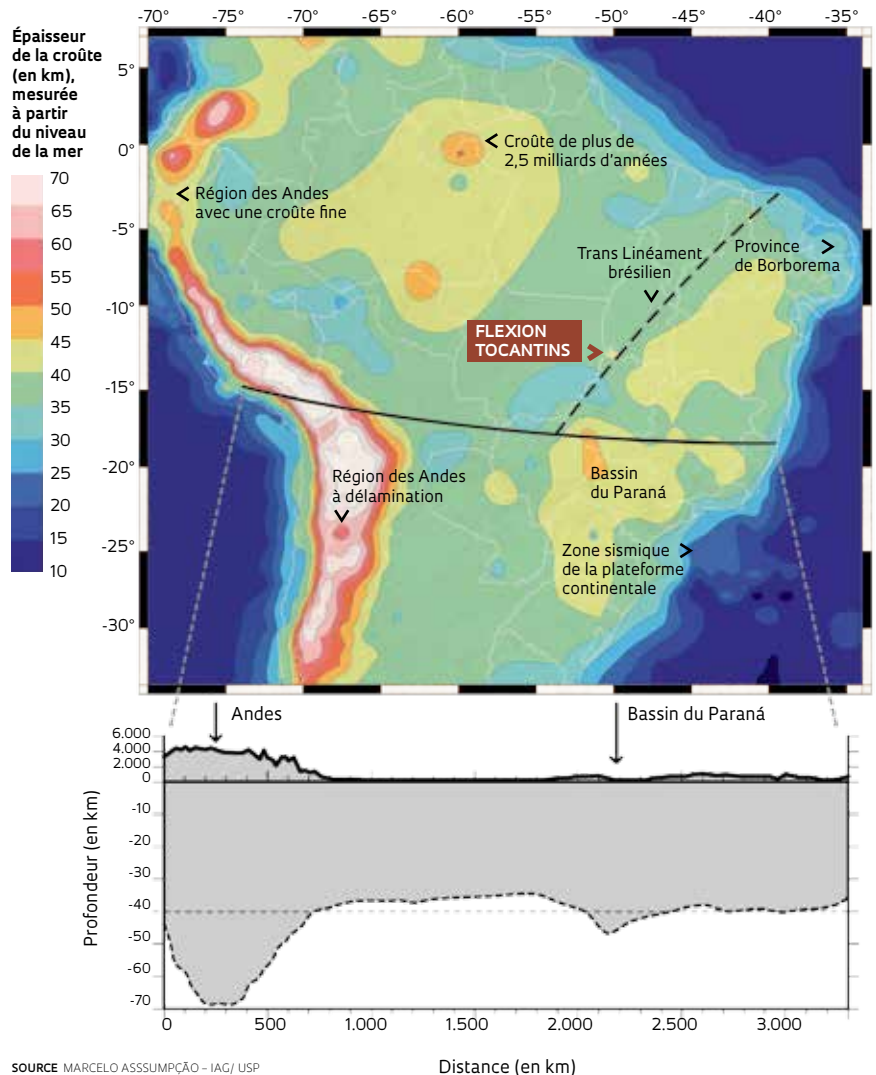
Des relevés montrent la différence d'épaisseur de la croûte terrestre au Brésil et dans la cordillère des Andes

Dans une étude publiée au mois de février de cette année dans la revue *Geophysical Research Letters*, le sismologue Marcelo Assumpção et le géophysicien Víctor Sacek présentent une explication plus complète (et pour beaucoup de gens, plus convaincante) pour expliquer cette concentration de secousses sismiques dans les états de Goiás et du Tocantins. A certains endroits de cette zone sismique, la croûte terrestre est plus fine qu'ailleurs dans le pays et subit la pression exercée par le poids du manteau, couche géologique inférieure à la croûte terrestre et plus dense qu'elle. Des mesures d'intensité du champ gravitationnel réalisées dans cette zone de croûte plus fine y indiquent un épaissement du manteau. Cette combinaison entre ces deux couches de roches (la croûte et la région supérieure du manteau qui d'un point de vue physique se comportent comme une structure unique et rigide appelée lithosphère) les plient comme une branche prête à se casser. Dans cette situation, la lithosphère peut se fissurer comme une règle en plastique que l'on plie en essayant d'en réunir les extrémités.

«La lithosphère tend à s'enfoncer là où elle est plus dense et à s'élever là où la densité est moindre», explique Marcelo Assumpção. «Ces tendances produisent des failles et éventuellement des tremblements de terre», ajoute le sismologue du IAG, et coordonnateur du Réseau Sismographique Brésilien qui surveille les séismes dans le pays.

Lors d'un entretien dans son bureau au début du mois d'avril, Víctor Sacek, co-auteur de l'étude, prend un livre avec une couverture flexible pour illustrer ce qui se passe dans la zone sismique Goiás-Tocantins où se trouve la ville de Mara Rosa. «Supposons que ce livre représente la lithosphère de la région, une augmentation de charge à l'intérieur de la lithosphère compte tenu d'une proportion plus importante de roches du manteau (plus denses), lui fera subir une flexion», explique-t-il en mettant le livre à l'horizontale et en exerçant une pression latérale, ce qui le fait se plier comme si un bloc de pierre était collé à la couverture inférieure. La partie supérieure est alors soumise à des forces de compression et l'inférieure à des forces de distension. «Bien qu'elle soit rigide, la lithosphère possède une certaine flexibilité et résiste jusqu'à un certain point à la déformation», explique Sacek. Mais à partir d'une certaine limite elle peut se plier et rompre.

Il y a quelques années, en analysant la carte de la distribution sismique au Brésil, Marcelo Assumpção s'est aperçu que la plupart des séismes avaient lieu dans la zone Goiás-Tocantins où, en 2004, le géophysicien Jesús Berrocal, ancien professeur de l'USP avait découvert une anomalie gravimétrique. Dans cette région le champ gravitationnel est anormalement élevé pour une région de plateau avec une altitude moyenne comprise entre 300 et 400 mètres. Sur ces terres planes et relativement basses (par



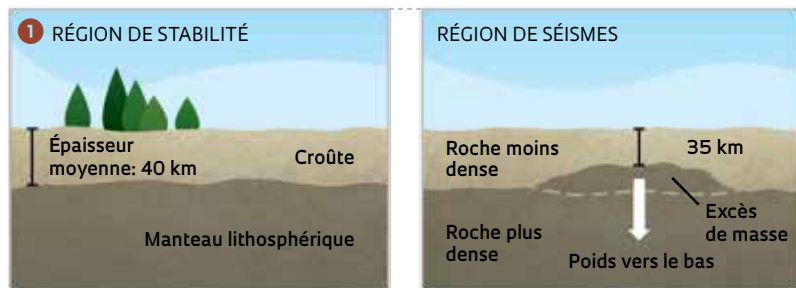
SOURCE MARCELO ASSUMPTÃO - IAG/ USP

exemple, on n'y trouve pas de montagnes) il n'y a pas d'excès de masse sur la surface qui puisse justifier la flexion de la lithosphère. Marcelo Assumpção a alors rapidement conclu que cette masse ne pouvait se trouver que sous la terre, probablement dans des régions profondes comme les couches plus superficielles du manteau, sachant que la croûte terrestre n'a que 35 kilomètres d'épaisseur dans cette région.

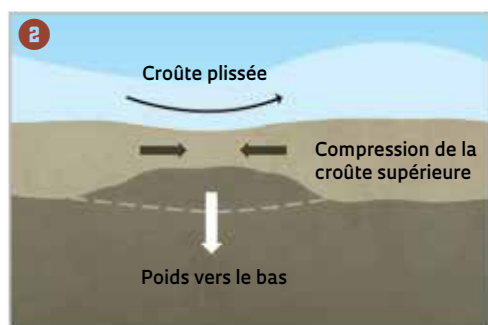
Mais il fallait vérifier la consistance de cette hypothèse et voir si l'épaissement du manteau pouvait réellement courber la lithosphère. Marcelo Assumpção a alors demandé à Víctor Sacek, spécialiste en simulations informatiques, de créer un modèle mathématique pour représenter les couches géologiques de cette région de Goiás et du Tocantins tenant compte de toutes les forces qui agissent sur elles. Víctor Sacek a alors développé un programme incluant autant l'effet de forces locales, créées à quelques dizaines de kilomètres de cette région sis-

6,2
C'est la
magnitude
du séisme
le plus intense
enregistré
au Brésil
en 1995

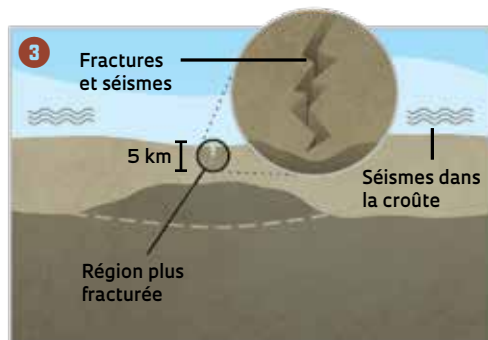
ZONE SISMIQUE GOIÁS-TOCANTINS



La croûte est stable là où il n'y a pas de failles géologiques et son épaisseur varie peu. L'épaississement du manteau dans les régions où la croûte est plus fine peut provoquer des tensions supplémentaires qui favorisent l'occurrence de séismes



La différence de poids entre les roches de la croûte et du manteau à la même profondeur provoque un plissement de la région plus fine compte tenu du poids supplémentaire en dessous d'elle. Cet effet de flexion comprime les roches proches de la surface



Ajoutée aux tensions exercées en bordure des plaques de la lithosphère, cette compression est excessive pour les roches à des profondeurs inférieures à 5 km, qui tendent à se fracturer provoquant des secousses sismiques

mique par des différences de relief (vallées, fleuves et collines) et des variations de l'épaisseur de la croûte, que l'effet des forces régionales à l'échelle planétaire qui ont lieu à des milliers de kilomètres en bordure des blocs où se divise la lithosphère.

En réunissant ces éléments, Victor Sacek a découvert une zone fragile de la croûte qui coïncide avec la zone de prévalence de séismes des états du Goiás et du Tocantins. Dans ce grand bloc de 200 kilomètres de large et de 5 kilomètres de profondeur, les forces sont si intenses qu'elles peuvent dépasser la limite d'élasticité des roches et les fragmenter. «Ce modèle explique même la profondeur des séismes qui généralement se produisent à moins de 5 kilomètres de la surface», affirme Victor Sacek.

Avec Marcelo Assumpção, il estime que ce mécanisme (l'effet de flexion dans des régions plus fines de la croûte) peut également être la cause de la fréquence élevée de séismes dans d'autres



STRESS CONSTANT

La lithosphère de la planète, formée par la croûte et par la partie supérieure du manteau, est divisée en plaques qui se déplacent et qui entrent en collision.

Le choc en bordure des plaques crée une tension qui se répand à l'intérieur des continents

régions du pays comme le bassin du pantanal et la zone sismique de Porto de Gaúchos, dans l'état du Mato Grosso, où, en 1955, a eu lieu la plus grande secousse sismique jamais enregistrée au Brésil et d'une magnitude de 6,2 degrés sur l'échelle de Richter. Les tremblements de terre d'une magnitude supérieure à 5 sont rares au Brésil, il y en a en moyenne un tous les cinq ans. Mais même faibles, ils effrayent généralement la population peu habituée aux séismes et peu préparée pour y faire face. Outre cette absence d'informations pour affronter les séismes, les habitations les plus précaires ne résistent pas aux petites secousses qui causeraient peu de dégâts dans une métropole. Le 9 décembre 2007, un séisme de magnitude 4,9 a endommagé plusieurs maisons à Caraíbas, aux alentours d'Itacarambi, située au nord de l'état de Minas Gerais, où l'écroulement d'un mur a tué un enfant. «C'est la seule mort directe causée par un séisme dont nous ayons connaissance dans le pays», relate le géologue Cristiano Chimpliganond, de l'UnB.

L'effet de flexion de la croûte explique également l'occurrence de séismes dans d'autres zones sismiques du Brésil comme c'est le cas en bordure de la plateforme continentale située entre les états du Rio Grande do Sul et de l'Espirito Santo où le fonds de l'océan s'enfonce abruptement à une distance qui varie entre 100 et 200 kilomètres de la côte. À cet endroit, la profondeur de l'océan passe de 50 mètres à 2 mille mètres. Les sédiments que les fleuves transportent vers la mer s'accumulent à l'extrémité de cet endroit, exerçant un poids supplémentaire sur la croûte. Marcelo Assumpção estime que cette surcharge est à l'origine des séismes détectés dans cette région selon des mécanismes similaires à ceux qui se manifestent dans les états de Goiás et de Tocantins. La différence dans les états de Goiás et de Tocantins. La différence dans ce cas là est que l'excès de masse ne se trouve pas sous la croûte mais au dessus.

Dans une étude réalisée en 2011, Marcelo Assumpção et des collaborateurs de l'Université Publique

Pauliste (Unesp), de l'Institut de Recherches Technologiques de São Paulo (IPT) et de Petrobras, ont analysé un séisme qui a eu lieu au mois d'avril 2008 à 125 kilomètres au sud de la ville de São Vicente, sur la côte pauliste et qui avait été ressenti jusqu'à São Paulo. Le point d'origine du séisme était justement localisé à l'extrémité du niveau de la plateforme continentale et les caractéristiques de ses ondes sismiques semblent confirmer qu'il a été déclenché par une surcharge de sédiments.

L'élaboration des modèles expliquant la cause des séismes brésiliens n'est devenue possible que grâce à la découverte des variations d'épaisseurs de la croûte terrestre dans le pays. Marcelo Assumpção et ses collaborateurs de l'UnB, de l'Université Fédérale du Rio Grande do Norte (UFRN) et de l'Observatoire National (ON) ont réuni des informations sur l'épaisseur de la croûte en analysant environ mille points en Amérique latine, tant sur le continent que dans l'océan. Sur ce total, environ 200 mesures ont été réalisées ces 20 dernières années grâce à un financement de la FAPESP et du gouvernement fédéral. Sur la carte qui synthétise ces données et publiée dans le *Journal of South American Earth Sciences*, les chercheurs attirent l'attention sur des régions où la croûte est plus épaisse ou plus mince. «L'épaisseur de la croûte est un des paramètres les plus importants pour comprendre la tectonique (les forces et les mouvements des couches géologiques) d'une région», affirme le sismologue Jordi Julià, de l'UFRN.

Cette étude est la compilation la plus complète et la plus détaillée faite sur la croûte brésilienne. L'épaisseur dans tous ces points a été obtenue à l'aide d'un croisement de données acquis grâce à trois méthodes qui utilisent les ondes sismiques pour déduire la structure des couches géologiques qu'elles traversent. La plus précise d'entre elles et aussi la plus chère concerne la réfraction sismique, dans laquelle les chercheurs enregistrent le long de centaines de kilomètres les séismes provoqués par des explosions contrôlées. Les deux autres méthodes se basent sur le suivi durant des années des séismes qui ont lieu autour du globe.

De manière générale, la croûte terrestre brésilienne possède une épaisseur similaire à celle des autres continents avec une moyenne de 40 kilomètres mesurée au niveau de la mer. Il y a cependant quelques régions dans le pays où la croûte atteint à peine 35 kilomètres. L'une d'entre elles, une étendue de terre d'environ mille kilomètres qui va du pantanal, dans l'état du Mato Grosso do Sul, jusqu'aux états de Goiás et du Tocantins, n'est pas encore bien définie car il y a peu d'informations sismiques disponibles sur cette région. Par contre, dans le Nordeste, où ont eu lieu la plupart des expérimentations de réfraction sismique menées par l'équipe de Reinhardt Fuck, de l'UnB, l'incertitude est moindre.

C'est là que se trouve la zone la plus vaste du territoire national avec une croûte plus mince et qui se situe dans la province de Borborema, bloc rocheux sur lequel s'assoient tous les états du Nordeste. C'est la région de plus grande occurrence de séismes du pays. Dans certains endroits de cette région, la croûte a moins de trente kilomètres d'épaisseur. Cet affinement semble avoir eu lieu au cours d'une période comprise entre 136 et 65 millions d'années, période durant laquelle l'Amérique du Sud s'est séparée de l'Afrique.

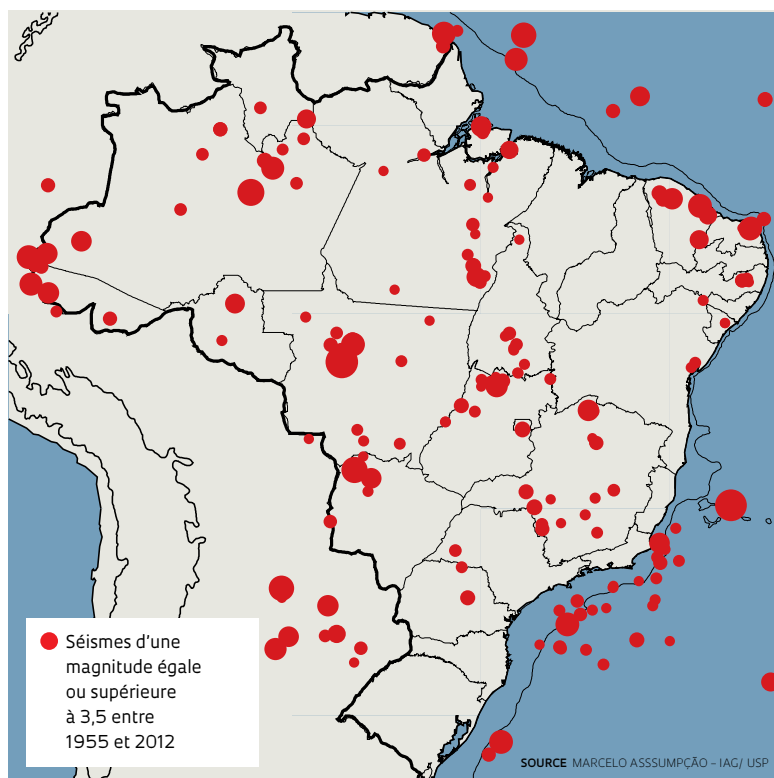
L'un des records d'épaisseur se trouve sous la forêt amazonienne, à la jonction des états de Roraima, d'Amazonie et du Pará. C'est l'un des morceaux de croûte les plus anciens du Brésil avec plus de 2,5 milliards d'années et une épaisseur de 45 kilomètres. «Ces régions plus anciennes tendent à avoir une croûte plus épaisse», déclare Marcelo Assumpção.

Mais la portion de croûte la plus épaisse du pays se trouve dans une région relativement jeune, le bassin du Paraná, qui a commencé à se former il y a 460 millions d'années. La croûte atteint 46 ki-

«La sismologie ne peut pas prévoir les tremblements de terre et même si elle y parvenait elle ne pourrait les éviter», déclare Lucas Barros, de l'UnB

Occurrence des séismes

Les tremblements de terre se concentrent dans des régions où la croûte est fine comme dans le Nordeste, le Centre-Ouest et la plateforme océanique





Cordillère des Andes: région d'Amérique du Sud où la croûte est plus épaisse et atteint 75 kilomètres

lomètres d'épaisseur à l'intérieur de l'état de São Paulo, près du fleuve Paraná. Marcelo Assumpção émet deux raisons possibles à cet épaississement. La première, suggérée par différentes études, est qu'il y aurait un bloc de croûte plus ancien sous le bassin du Paraná, âgé de milliards d'années et appelé craton du Paranapanema. La deuxième raison est liée à l'intense activité volcanique dans cette région il y a 130 millions d'années. Pour différentes motifs que l'on ignore encore, le manteau sous le bassin du Paraná est devenu anormalement chaud, phénomène que les géologues appellent panache thermique. Ce panache aurait partiellement fondu les couches profondes de la terre, créant des magmas de composition basaltique qui se sont déversés à la surface et il serait à l'origine de l'une des plus grandes régions volcaniques de la planète. Ces roches ont créé des étendues de terre rouge qui sont très fertiles. Une partie du matériel créé durant ce processus est resté en dessous, et quand le manteau a refroidi, il s'est soudé à la portion inférieure de la croûte, augmentant son épaisseur.

Marcelo Assumpção a élargi la cartographie de la croûte à la cordillère des Andes avec l'aide de chercheurs chiliens et chinois. Sous cette chaîne de montagne, l'épaisseur de la croûte varie de 35 kilomètres, à la frontière du Pérou avec l'Équateur, à 75 kilomètres dans l'altiplano bolivien. Cette épaisseur maximale est également observée dans d'autres régions montagneuses relativement jeunes comme l'Himalaya. Il y a généralement un rapport direct entre l'altitude d'un terrain et l'épaisseur de la croûte. «Plus la topographie est élevée, plus la croûte sera épaisse», explique Marcelo Assumpção. «Il est normal que la croûte atteigne 70 kilomètres d'épaisseur pour des altitudes supérieures à 3 mille mètres».

Mais il y a des exceptions. Dans le nord de l'Argentine, là où les Andes se dressent à plus de 4 mille kilomètres d'altitude, la croûte a moins de 55 kilomètres d'épaisseur. Les chercheurs ont à nouveau émis deux hypothèses. Soit la croûte était déjà anormalement fine bien avant la formation des Andes, soit elle est devenue si épaisse et si chaude il y a 4 millions d'années qu'elle a perdu

une partie de ses couches plus profondes, phénomène connu sous le nom de délamination.

À la frontière du Pérou et de l'Équateur, où l'altitude dépasse les 3 mille mètres son épaisseur est d'à peine 35 kilomètres. Dans ce cas là, la croûte semble être soutenue par le mouvement des courants des couches plus profondes du manteau qui bien qu'ils soient faits de roches se comportent comme un liquide extrêmement visqueux qui s'écoule à l'échelle de temps géologique de quelques centimètres par an. La force de ces courants ascendants est capable de soulever la croûte, augmentant la hauteur des montagnes d'un ou deux kilomètres. L'effet inverse peut également se produire. Dans certaines régions, le flux descendant peut tirer la croûte vers le bas, comme dans le bassin de Marañon, situé entre l'Équateur, le Pérou et la Colombie, selon les observations de Victor Sacek et de Naomi Ussami, géophysicienne à l'USP.

Malgré vingt années d'études, les recherches dans ce domaine en Amérique du Sud ont pris du retard. Les États-Unis et l'Europe disposent de cartes détaillées sur l'épaisseur de la croûte depuis la fin des années 90. «Les progrès en matière de cartographie de la croûte terrestre varient selon les niveaux de revenu par habitant de chaque pays», déclare Marcelo Assumpção. «Nous sommes juste meilleurs que l'Afrique».

Les principales institutions de recherche brésilienne dans ce domaine se sont regroupées il y a deux ans et ont fondé le Réseau Sismographique Brésilien, qui possède 50 stations sismologiques et qui prétend en avoir 80 dans l'avenir. Les chercheurs espèrent ainsi mieux surveiller le pays et augmenter la définition de la carte. Plus on observera de séismes plus on pourra obtenir des détails sur l'épaisseur de la croûte. Cet apport de détails permettra de créer des modèles qui pourront prévoir avec précision les zones pouvant être touchées par des séismes de plus grande magnitude. «La sismologie ne peut pas prévoir les tremblements de terre et même si elle y parvenait elle ne pourrait les éviter», déclare Lucas Barros. «C'est pour cela que nous devons apprendre à vivre avec eux et à nous en protéger». ■

Projet

Évolution tectonique, climatique et érosive en bordures convergentes: une approche digitale (n° 2011/10400-0); **Modalité:** Bourse de post-doctorat; **Coordination:** Victor Sacek – IAG/USP; **Investissement:** 153 896,91 de reais (FAPESP).

Articles scientifiques

ASSUMPÇÃO, M. e SACEK, V. Intra-plate seismicity and flexural stresses in central Brazil. *Geophysical Research Letters*. v. 40 (3), p. 487-91. 16 fev. 2013.

ASSUMPÇÃO, M. et al. Crustal thickness map of Brazil: Data compilation and main features. *Journal of South American Earth Sciences*. v. 43, p. 74-85. abr. 2013.

ASSUMPÇÃO, M. et al. Models of crustal thickness for South America from seismic refraction, receiver functions and surface wave dispersion. *Tectonophysics*. 2013 (on-line).