

vation du sol résultant des séismes : ils ont notamment étudié l'île de Vancouver qui mesure environ 100 kilomètres de côté, à raison d'un point tous les 100 mètres ; l'erreur verticale sur l'ensemble du réseau ne dépasse pas le centimètre.

Une autre méthode utilise les marégraphes qui donnent la hauteur des marées par rapport à la côte. Initialement, ces instruments étaient utilisés pour étudier l'océan, mais, grâce à des enregistrements continus depuis plus de 20 ans, il est possible d'utiliser le niveau moyen de la mer comme niveau de référence pour suivre les minuscules déplacements verticaux des terres. Les mesures ne donnent pas directement ces déplacements : on doit les traiter afin d'éliminer les effets des marées et des autres phénomènes océaniques, tels les courants d'El Niño, qui peuvent durer des années, ceux de l'augmentation globale du niveau de la mer (environ deux millimètres par an) et du rebond postglaciaire, dû à la remontée continue de la croûte, que les glaciers maintenaient enfoncée lors de la dernière époque glaciaire.

La mesure du champ de gravité, qui varie comme le carré de la distance au centre de la Terre, est une troisième

manière de détecter les mouvements verticaux de la croûte. Bien que nous ne ressentions pas les faibles variations de notre propre poids quand nous changeons d'altitude, des appareils sensibles détectent les variations de l'intensité de la pesanteur. En mesurant la gravité au même point, à quelques années d'intervalle, on parvient à estimer la variation d'altitude du lieu.

Enfin, depuis quelques années, le système de positionnement par satellite (*Global Positioning System*, GPS) permet la mesure des distances et des variations d'altitude de points espacés de plusieurs centaines de kilomètres. Des chercheurs canadiens ont utilisé le GPS pour montrer que la côte de Victoria se rapproche de près de un centimètre par an d'un point situé à 300 kilomètres à l'intérieur des terres. Dans le futur, le système GPS, qui est précis et peu coûteux, pourrait être le moyen le plus efficace pour mesurer les bombements et les écrasements de la croûte qui annoncent les tremblements de terre.

Toutes ces méthodes donnent des résultats similaires : la marge continentale de la région des Cascades se soulève de un à quatre millimètres et se contracte horizontalement de plusieurs centimètres par an. Ces déformations sont les preuves que la croûte

est prise en tenaille entre les plaques convergentes. Elles enregistrent la lente, mais inexorable accumulation des contraintes et annoncent une libération catastrophique de l'énergie de déformation de la croûte.

Un fauteur de troubles coïncé

Afin de préciser les risques sismiques, nous avons étudié l'extension de la zone bloquée en confrontant les observations de terrain avec des simulations mathématiques de la déformation. Ces comparaisons nous ont révélé l'état de la zone bloquée à grande profondeur. À l'endroit le plus profond de cette zone, du côté du continent, il existe une transition progressive entre des segments complètement bloqués et d'autres qui glissent librement. Sur la plus grande partie de la côte, la zone bloquée pénètre sur une largeur de 50 à 100 kilomètres sous le plateau continental (elle s'élargit beaucoup près de la côte septentrionale de l'État de Washington). Cette surface de faille considérable peut engendrer des séismes catastrophiques. Elle est toutefois beaucoup plus étroite que les autres zones de subduction connues. Pourquoi cette particularité ? Principalement en raison des variations de la



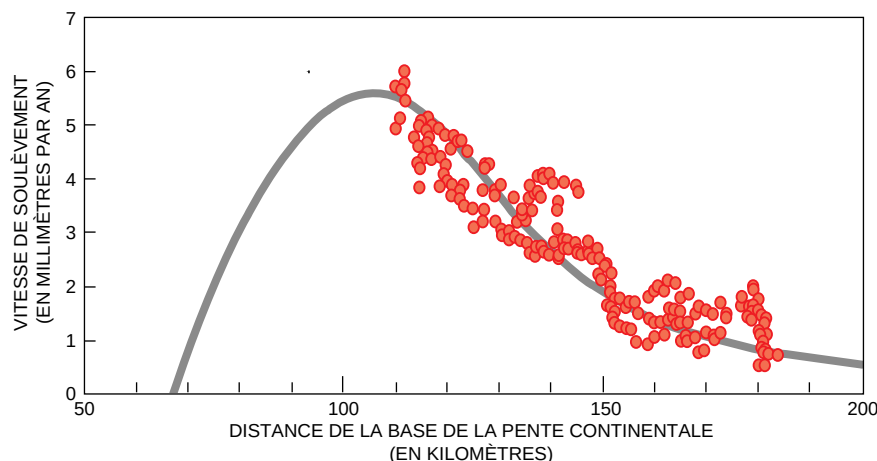
5. LES DÉFORMATIONS DE LA CROÛTE sont extrêmement lentes, mais des mesures soigneuses montrent les infimes mouvements du sol. La télémétrie par laser, entre les sommets des montagnes, détecte la contraction horizontale de la région depuis plus de dix ans. Les instruments modernes de positionnement par satellite (GPS) ont facilité la réalisation de relevés géodésiques précis.

température en fonction de la profondeur. Près de la surface, les sédiments argileux qui tapissent le plancher océanique lubrifient la partie de la faille proche de l'océan. Cependant, plus profondément, les argiles se transforment en des minéraux plus durs, qui empêchent la faille de glisser. Ces changements minéralogiques se produisent à une profondeur de dix kilomètres environ, c'est-à-dire lorsque la température atteint 150 degrés.

L'augmentation de température détermine également la position de la partie profonde de la zone bloquée vers le continent. Aux températures modérées, les roches ont des comportements de frottement normaux : la très forte résistance au mouvement chute lorsque la faille commence à bouger. Ainsi, une fois le glissement commencé, le mécanisme s'emballé, libérant l'énergie élastique et causant un séisme. En revanche, plus en profondeur, dans la croûte, lorsque la température est supérieure à 350 degrés, les roches en contact sur les bords de la faille se comportent comme des fluides visqueux : plus les mouvements sont rapides, plus la résistance est forte. Les parties les plus profondes et les plus chaudes de la faille peuvent alors se déformer par fluage sans engendrer d'ondes élastiques.

Ces températures correspondent-elles aux véritables limites de la zone bloquée? Nous avons étudié cette question en modélisant numériquement les températures sur la faille de la zone de subduction. Les résultats ont confirmé que la profondeur à laquelle la roche atteint une température de 350 degrés correspond bien à la limite profonde de la zone bloquée déterminée par les mesures de déformation.

Une question demeure néanmoins : la zone que nous avons modélisée correspond-elle réellement à la région source des grands tremblements de terre? Nous le pensons, car le déplacement vertical que notre modèle prédit pour une rupture de la zone bloquée rend bien compte des observations des dépôts côtiers enfouis. Des indications supplémentaires nous encouragent à appliquer notre méthode à d'autres zones de subduction. Avec mes collègues Kelin Wang et Makoto Yamano, de l'Université de Tokyo, j'ai montré que la largeur de la zone bloquée de la marge Nankai, au Sud-Ouest du Japon, correspond à la surface de rupture du séisme de magnitude huit qui a frappé cette région en 1940. Par analogie, nous



6. LES NIVELLEMENTS successifs de la côte de la région des Cascades montrent son soulèvement (les points rouges). Les calculs (la courbe grise) rendent bien compte des observations pour la déformation de la plaque Nord-américaine ; ils servent à localiser la partie bloquée de la faille de subduction.

pouvons prévoir le séisme qui frappera la côte Nord-américaine.

Le jour de la catastrophe

Quelle pourrait être l'intensité du mouvement du sol pour les villes de la côte Ouest pendant un grand séisme? Tout dépend de la magnitude du séisme et de la position de son foyer. La magnitude maximale, tout d'abord, dépend de la distance de la côte au lieu de libération de l'énergie sismique. Si l'on se fonde sur les études de séismes déjà analysés, une rupture de toute la faille, de la Colombie britannique jusqu'à la Californie, serait surprenante. Toutefois, si la totalité de la zone bloquée (une surface de près de 100 000 kilomètres carrés) lâchait d'un coup, le séisme pourrait avoir une magnitude égale à neuf, et les dégâts seraient bien pires que ceux du séisme de San Francisco en 1906. Seulement deux événements de cette taille ont été enregistrés à ce jour : un tremblement de terre le long des côtes du Chili, en 1960, et un autre en Alaska, en 1964.

Il existe deux manières d'estimer le mouvement du sol qui résulterait d'un tel séisme. La première consiste à comparer les situations le long de la côte Ouest de l'Amérique du Nord avec ce qui s'est passé ailleurs. La seconde revient à utiliser des modèles de rupture élastique et de déplacements de failles. La conclusion des deux approches est semblable : le prochain grand séisme dans la région des Cascades engendrera des ondes sismiques destructrices qui dureront plusieurs minutes ; puis, lorsque les secousses cesseront, la plupart des régions

côtières se seront enfoncées de un à deux mètres et auront été déplacées de près de dix mètres vers la mer.

Heureusement, la partie bloquée de la faille qui engendrerait un tel tremblement de terre est située principalement sous le plateau continental et ne s'étend que peu sous la côte. Ainsi, Vancouver, Seattle et Portland (qui sont entre 100 et 200 kilomètres à l'intérieur des terres) sont moins exposées aux secousses que les sites proches de la côte Ouest ; elles restent toutefois menacées, car l'énergie sismique se propage à des distances considérables. Plus généralement, les Américains et les Canadiens de la côte Pacifique qui pensaient vivre sur un sol tranquille doivent accepter d'être sous la menace permanente d'un tremblement de terre destructeur.

Roy HYNDMAN est chercheur au Centre de géosciences du Pacifique du Service géologique canadien.

A. NELSON et al., *Radiocarbon Evidence for Extensive Plate-Boundary Rupture about 300 Years ago at the Cascadia Subduction Zone* in *Nature*, vol. 378, pp. 371-374, 23 novembre 1995.

Garry C. ROGERS, *Seismic Potential of the Cascadia Subduction Zone*, in *Nature*, vol. 332, p. 17, 3 mars 1988.

Thomas H. HEATON, *Cascadia Subduction Zone : The Calm before the Quake?*, in *Nature*, vol. 343, pp. 511-512, 8 février 1990.

R.B. HYNDMAN et K. WANG, *Thermal Constraints on the Zone of Major Thrust Earthquake Failure : The Cascadia Subduction Zone*, in *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, vol. 98, n° 2, pp. 2039-2060, 10 février 1993.
