



Idées débats, tribunes

Éric Calais

GÉOLOGUE, MEMBRE DE
L'ACADÉMIE DES SCIENCES

Scruter la Terre au millimètre près

La nouvelle série de notre partenariat avec l'Académie des sciences présente un éclairage sur l'actualité de la recherche scientifique à travers l'expérience personnelle d'académiciens nouvellement élus, dans toutes les disciplines.

■ Éric Calais, géologue, professeur à l'École normale supérieure, expose comment le suivi de la forme de la Terre par des techniques spatiales permet de comprendre les processus naturels qui agitent notre planète. Elles permettent notamment d'observer le cycle de vie des failles sismiques et de proposer un changement de paradigme pour expliquer les séismes qui ont lieu hors des frontières entre les plaques tectoniques. Ces avancées sont cruciales pour mieux comprendre et déterminer l'aléa sismique, y compris en France métropolitaine.

Océans, continents, chaînes de montagnes, volcans : la géodiversité de notre planète Terre est étonnante. Une planète qui peut sembler statique et peu changeante – mais pas pour le géologue, qui extrait des roches leur histoire et sait donc que le visage de la Terre est constamment modifié. La tectonique des plaques, manifestation en surface des mouvements qui agitent la Terre en interne, fournit un cadre logique à la formation des océans et des chaînes de montagnes, ou encore à l'occurrence des séismes et des volcans. Mais la Terre se déforme aussi sous le poids des glaces ou des eaux océaniques et continentales, qui varient avec l'évolution des

directement mesurables, à l'échelle humaine, grâce à la géodésie spatiale, littéralement la « mesure de la forme de la Terre depuis l'espace ». La course à l'espace lors de la guerre froide a permis de développer les technologies nécessaires à la mise en orbite de satellites artificiels. L'un de ces systèmes spatiaux, le GPS, permet le positionnement précis pour tous et tout le temps. Il a en quelque sorte démocratisé la géodésie spatiale. On connaît son impact sur la vie courante : qui n'a pas de GPS dans son smartphone ? Mais on sait moins qu'il a permis des découvertes scientifiques récentes de premier plan.

J'étais jeune chercheur à la Scripps Institution of Oceanography, en

rer directement le mouvement des plaques tectoniques. La tâche était cependant ardue car le coût des équipements était très élevé et le nombre de stations de mesure faible. Aujourd'hui, on mesure des positions avec une précision millimétrique en temps quasi réel et on les suit au cours du temps à partir de plusieurs milliers de stations réparties sur l'ensemble des terres émergées de la planète.

L'IMPACT DU POIDS DE L'EAU

Le GPS, maintenant complété par d'autres systèmes équivalents comme le Galileo européen, a donc changé la donne. Il permet de mesurer directement l'accumulation d'énergie sismique le long des failles actives aux frontières entre les plaques tectoniques. Cette information nous avait permis, par exemple, de montrer, dès 2008, que la faille responsable du séisme dévastateur d'Haïti en 2010 était capable de générer un séisme de magnitude 7,2, ce qui s'est effectivement produit. Une autre technique de géodésie spatiale s'est récemment ajoutée à notre boîte à outils – l'interférométrie radar –, qui permet une couverture spatiale complète, avec une précision de mesure de l'ordre du centimètre. Les mesures géodésiques permettent donc de suivre le cycle de déformation au voisinage des grandes failles sismiques, qui,

Les changements de forme de notre planète sont aussi des indicateurs de son état de santé climatique.

températures globales – les changements de forme de la Terre sont donc aussi des indicateurs de son état de santé climatique. Ces changements de forme sont minimes – quelques millimètres à centimètres par an –, mais contiennent des informations fondamentales sur les processus qui agitent notre planète. Aujourd'hui, ces déformations sont

Californie, au début des années 1990, quand cette technique commençait à devenir suffisamment précise pour des applications à la mesure des déformations de la Terre. Nous mettions alors au point les méthodes qui permettaient d'extraire du GPS des positions de précision centimétrique, nous mettant en capacité, par exemple, de mesu-



Une catégorie de séismes – ceux des continents stables – n'est pas le résultat de la tectonique des plaques.

pendant la plus grande partie de leur vie sont bloquées, ne relâchant l'énergie élastique qui s'accumule alentour que ponctuellement, par un glissement quasi instantané lors de grands séismes. Mais la géodésie spatiale montre maintenant que le « cycle de vie » des failles contient aussi des épisodes pendant lesquels elles glissent lentement et silencieusement – sans causer de séismes. Nous l'avons observé, par exemple, dans le rift est-africain, en août 2007, où une faille glissa d'un mètre en une semaine sans séisme associé. Ces observations ouvrent la voie à la compréhension des propriétés mécaniques des systèmes de failles, et peut-être un jour à la prédiction des séismes.

La géodésie spatiale permet aussi de mesurer avec suffisamment de précision les mouvements verticaux de la croûte terrestre dus au poids des masses d'eau continentales. Par exemple, des collègues californiens

ont pu « peser » le déficit d'eau lors de la grande sécheresse qui a affecté l'ouest des États-Unis de 2013 à 2017 en mesurant entre 5 et 10 mm de subsidence à partir de plusieurs centaines de stations GPS installées dans la région. Et ce type de déformation ne laisse pas la croûte terrestre indemne : nous avons récemment montré que le poids de l'eau dans la haute vallée du Mississippi, près de Memphis, qui varie en fonction des saisons, induisait une flexure suffisante de la croûte terrestre pour expliquer la sismicité régionale saisonnière que l'on y observe.

DÉTECTER DE NOUVELLES FORMES DE SIGNAUX

L'apport de la géodésie spatiale, au cours de la dernière décennie, à notre connaissance des déformations de la Terre, notamment celles qui conduisent à des séismes, a donc été majeur.

Il reste cependant une catégorie de séismes qui échappent à notre compréhension, ceux des continents stables, loin des frontières entre les plaques tectoniques. S'ils sont relativement rares, ils affectent des régions non préparées et font systématiquement de forts dégâts. Ils posent des problèmes spécifiques pour le dimensionnement et la maintenance d'ouvrages sensibles, nucléaires par exemple, dans des zones réputées géologiquement stables – comme une grande partie de la France métropolitaine. La géodésie spatiale dans ces régions indique que les failles sismiques, contrairement à leurs alter ego en frontière de plaque, n'y accumulent pas d'énergie élastique – les séismes y relâchent donc une énergie « fossile » accumulée au cours des temps géologiques anciens. Nous comparons ces régions à des blocs de béton précontraint : ils sont, à la fois très résistants globalement et très fragiles localement. De fait, une perturbation locale, même faible, des contraintes mécaniques peut déclencher un séisme. De telles perturbations accompagnent, par exemple, la migration naturelle de fluides au sein de la croûte terrestre. La mesure de zéro (!) par géodésie spatiale apporte donc une information cruciale qui nous amène à revoir notre modèle conceptuel pour ces séismes qui ne sont pas le résultat de la tectonique des plaques.

Les techniques de géodésie spatiale permettent donc de suivre la forme de la Terre au millimètre près quasiment partout et en continu. Un des défis actuels est la quantité de données issues des capteurs terrestres ou spatiaux qui prennent le pouls de notre planète. Cette masse de données implique que nous cherchions de nouvelles méthodes pour y détecter des signaux géologiques pertinents – avec la difficulté que nous ne connaissons souvent pas, a priori, la forme de ces signaux. Les techniques dites de l'intelligence artificielle vont certainement, dans notre domaine comme dans d'autres, nous permettre de faire un nouveau pas en avant dans les années à venir. ★

POUR EN SAVOIR PLUS

LE SITE DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES :

www.academie-sciences.fr

« APPORTS RÉCENTS DE LA GÉODÉSIE SPATIALE AUX MESURES DES DÉFORMATIONS DE LA TERRE »,

conférence d'Éric Calais à l'ENS, 8 février 2017, savoirs.ens.fr/expose.php?id=3111

« HAÏTI : UNE FAILLE SOUS LA FAILLE »,

de François Savatier, publié dans « Pour la science » (22 janvier 2011), présente les recherches scientifiques menées pour déterminer les causes du séisme du 12 janvier 2010, leurs résultats, et décrit notamment la modélisation du séisme par Éric Calais et ses collègues. www.pourlascience.fr/sd/geosciences/haiti-une-faille-sous-la-faille-10830.php

« SCIENCE ET CONSCIENCE DANS LA POST-URGENCE DU SÉISME D'HAÏTI », D'ÉRIC CALAIS. ÉDITIONS L'HARMATTAN, 2017.

Le tragique séisme du 12 janvier 2010 en Haïti n'a pas surpris les scientifiques, mais a pris de court un pays qui n'était en rien préparé et la communauté internationale. Pourtant, la menace sismique était connue et les dégâts à attendre ne faisaient aucun doute. Ce livre décrit, en termes simples, l'information scientifique disponible avant le séisme, l'expérience personnelle de l'auteur en Haïti dans la post-urgence du séisme, et analyse les succès, les échecs et les défis pour insérer une information scientifique pertinente dans l'agenda de la réponse et de la reconstruction après une catastrophe majeure.