

LA VAGUE ET LE SATELLITE

Pierre Bosser exploite les mesures des stations GPS terrestres japonaises, acquises avant, pendant et après le séisme du 11 mars 2011, dans le cadre d'un projet de l'Agence nationale de la recherche. L'enjeu ? L'anticipation des catastrophes naturelles, et la préservation de milliers de vies humaines.

«Subduction», disent les géologues, pour désigner l'étrange reptation des plaques tectoniques. Un mouvement d'aspiration, de séduction, un enroulement infiniment long des écailles qui composent la croûte terrestre, et plongent les unes sous les autres avec une lenteur tectonique.

En moyenne, la plaque Pacifique se glisse sous le Japon à raison de 8 cm par an. Elle fonce à toute lenteur vers le centre de la Terre, forçant le passage, contraignant ses voisines, notamment près de la surface, où les plaques frictionnent. Les contraintes s'accumulent. Des ressorts se tendent durant des siècles, comme dans une machine de guerre moyenâgeuse. Quand ils cèdent, ils rendent en quelques minutes l'énergie folle qu'ils ont accumulée — l'équivalent cette fois de 600 millions de bombe d'Hiroshima. Au Japon, ce fut le 11 mars 2011, à 14 h 46, heure locale. L'épicentre du séisme fut presque instantanément localisé

au large, à 160 km de la ville de Sendai et à une profondeur d'environ 30 km, grâce aux premières ondes se déplaçant à plus de 6 km par seconde. Depuis le traumatisme de Kobé, en 1995, le Japon est bardé de capteurs sismologiques. C'est sur eux que repose la toute première alerte. Dès 14 h 49, la magnitude fut annoncée à 7,9 sur l'échelle de Richter, accompagnée d'une alerte tsunami annonçant une vague de 6 mètres. La magnitude fut relevée deux jours plus tard à 9, ce qui fit du séisme



Le chercheur
Pierre Bosser
Ingénieur à l'IGN
et enseignant-chercheur
à l'ENSG

le quatrième jamais mesuré sur Terre, comparable à ceux qui secouèrent Sumatra en 2004 (magnitude 9,2), et le Chili en 2010 (8,8).

Le Japon vit avec les tremblements de terre depuis qu'il est Japon. Ses architectes sont des maîtres de la construction parasismique. Grâce notamment aux progrès des dernières années dans la prévention du risque sismique, le tremblement de terre lui-même fit peu de victimes quand celui de Kobé, pourtant

400 fois moins puissant, tua plus de 6 400 personnes. Mais la secousse de 14 h 46 ne fut que le prélude à une catastrophe de bien plus grande ampleur : les dispositifs de reconnaissance et d'alerte avaient, en même temps que la magnitude, largement sous-estimé l'ampleur du tsunami qui allait ravager les côtes.

PROJET ANR-FLASH / JST-RAPID

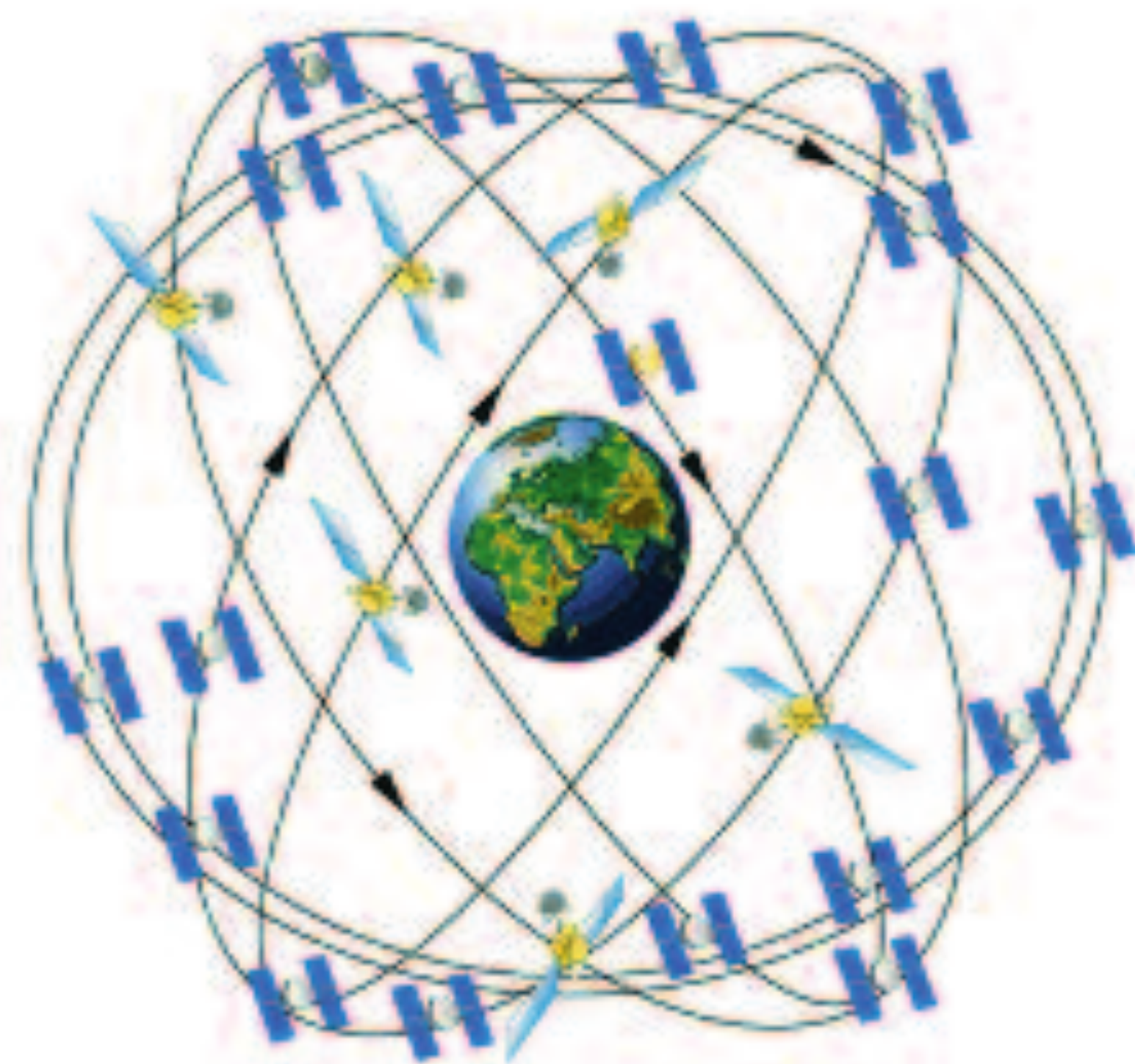
Lorsque l'énergie du «ressort» est libérée, la plaque en compression se détend et déforme le fond de l'océan. Ce sont ces déformations à très grande échelle (des distances de plus de 100 km) qui génèrent un tsunami. Celui du 11 mars mit moins de 30 minutes à atteindre les côtes les plus proches de l'épicentre. Ses vagues mesuraient par endroits 25 mètres de haut, soit quatre fois plus que ce qui fut anticipé par les autorités lors de la construction des défenses côtières des villes et villages les plus exposés. Le tsunami emporta plus de 15 000 personnes. Il endommagea plusieurs réacteurs nucléaires disposés le long des côtes japonaises, dont deux réacteurs à eau bouillante de la centrale nucléaire de Fukushima, entraînant l'évacuation d'un demi-million de réfugiés.

Le projet TO-EOS

> TO-EOS est l'acronyme de *Tohoku-Okai Earthquake from Earth to Oceans and Space* : ce projet coordonné par Anthony Sladen, du laboratoire Géoazur, fait partie du programme "Flash" (18 mois) de l'Agence nationale de la recherche (ANR). Il vise à analyser conjointement les enregistrements terrestres, marins et spatiaux afin d'évaluer différentes approches permettant de mieux anticiper de futurs séismes et tsunamis. Ces approches peuvent être basées sur le long terme (l'accumulation des contraintes plusieurs siècles avant la rupture), le court terme (l'évolution des propriétés sur la faille dans les jours précédant la rupture), ou permettre la caractérisation de l'événement dans les minutes suivant son apparition.



Lames de fond
Le 11 mars 2011, un tsunami déferle sur les côtes japonaises. Ici à Minamisoma, dans la préfecture de Fukushima.



© GPS.GOV

Constellation
Vue schématique de la constellation de satellites GPS autour de la Terre.

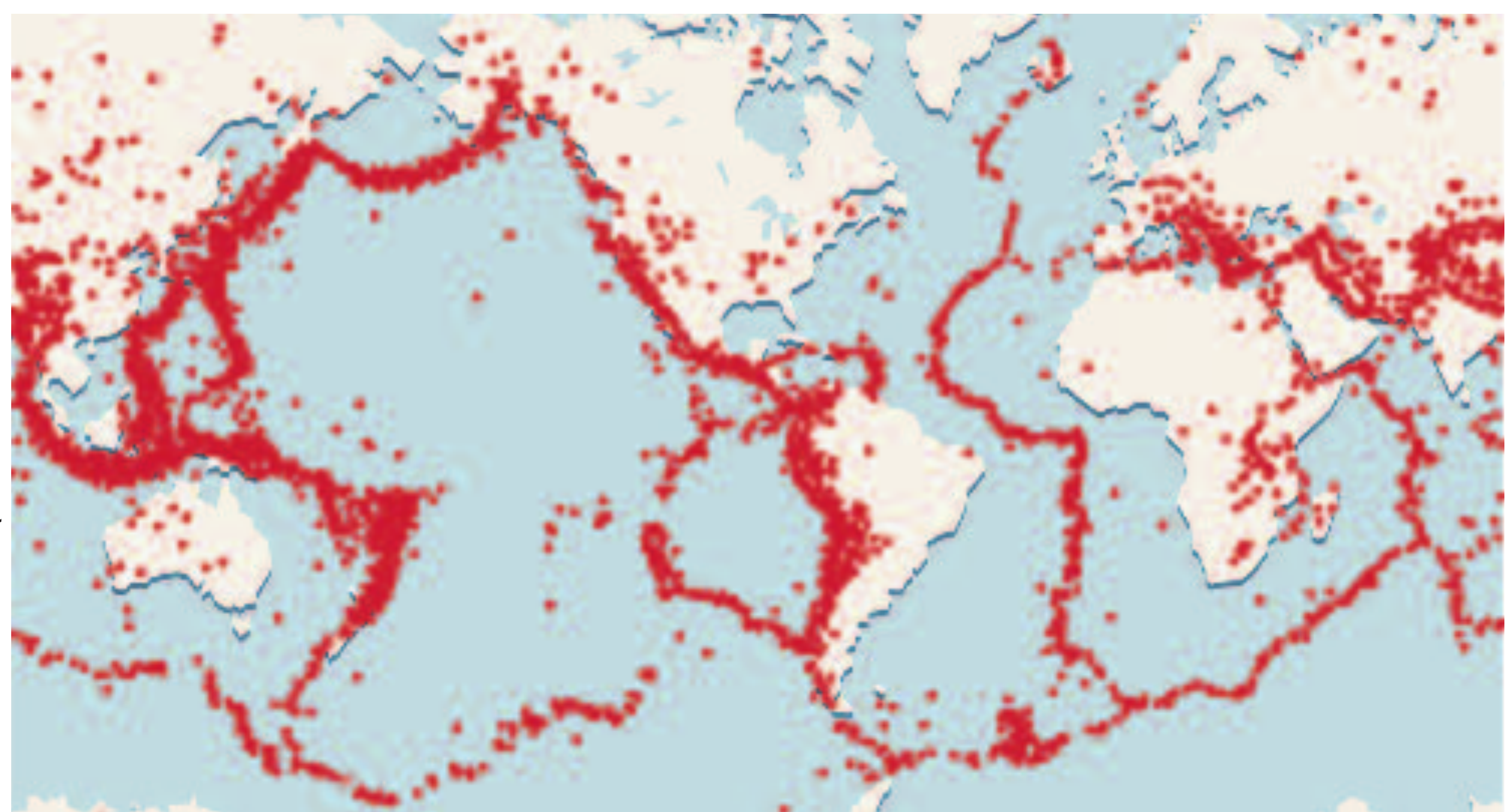
Pourtant «*le Japon est méga instrumenté*», rappelle Pierre Bosser dans son bureau de l'ENSG, avec vue sur le campus de Champs-sur-Marne. Pierre Bosser, 31 ans, est enseignant-chercheur à l'ENSG, associé au Lareg, le laboratoire de recherche en géodésie de l'IGN. Sa thèse de doctorat portait sur l'amélioration des méthodes de calculs GPS par une meilleure prise en compte de la dégradation des signaux lors de la traversée de l'atmosphère. Elle s'intitulait «*Développement et validation d'une méthode de calcul GPS intégrant des mesures de profils de vapeur d'eau en visée multi-angulaire pour l'altimétrie de haute précision*» et fut soutenue en 2008. Depuis 2011, Pierre Bosser analyse les données des stations GPS japonaises terrestres dans le cadre du projet TO-EOS. TO-EOS est l'acronyme de «*Tohoku-Oki Earthquake from Earth to Ocean and Space*»: Tohoku est le nom de la région du nord-est du Japon qui a le plus fortement ressenti le séisme du 11 mars et Tohoku-Oki est le nom du séisme. Ce projet a été sélectionné par le programme Flash initié conjointement, seulement quelques mois

après la catastrophe, par l'Agence nationale de la recherche (ANR) et son homologue au Japon, la JST (*Japan Science and Technology Agency*). Ce programme associe et compare la recherche de mouvements à terre, dans l'espace et en mer, l'étude des signaux GPS valant à la fois pour l'espace et la mer. En utilisant l'énorme quantité d'observations effectuées depuis la Terre, l'océan et l'espace, est-il possible d'anticiper l'occurrence des futurs grands séismes?

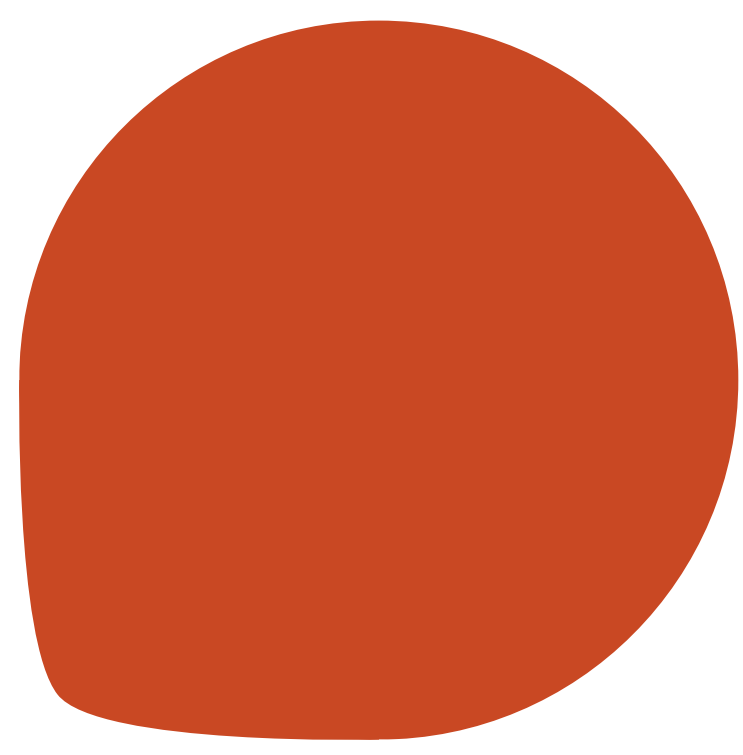
UN PROJET INTERNATIONAL

Lancé en octobre 2011, le projet associe le laboratoire Géoazur (installé à Sophia-Antipolis, près de Nice), l'Institut de physique du globe de Paris (IPGP), l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN), le Commissariat à l'énergie atomique (CEA) et deux instituts japonais : l'*Earthquake Re-*

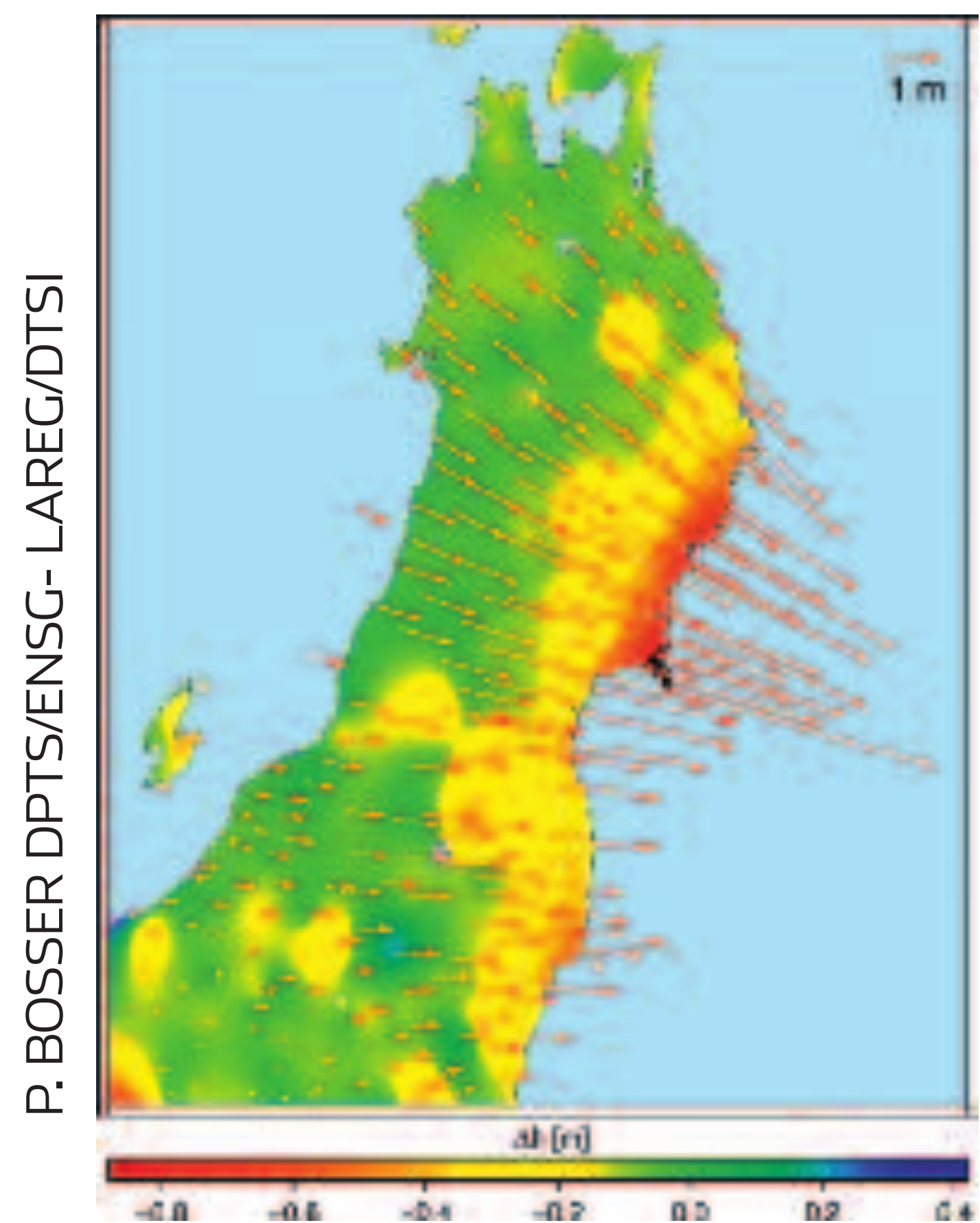
search Institute (ERI) de l'université de Tokyo et le *Geospatial Information Authority* (GSI, l'équivalent japonais de l'IGN). «*Ils avaient besoin d'un organisme qui sache traiter les signaux GPS*», dit modestement Pierre Bosser. Les GPS, terrestres ou volants, il connaît. Ceux du Japon, il est allé les voir sur place : environ 1200 stations terrestres permanentes, soit une tous les 20 km. Leur radôme blanc les fait ressembler à des cotons-tiges de 5 mètres de haut. Elles font du réseau Geonet japonais l'un des plus denses de la planète. Le réseau GNSS permanent (RGP) qu'entretient l'IGN en France se contente de 332 stations pour un territoire une fois et demie plus grand. Le Japon dispose du «*top du matériel*», entretenu par le GSI. Les données sont enregistrées chaque seconde et transmises en continu aux salles de contrôle. Ces données à haute fréquence sont conservées deux semaines, sauf cas exceptionnel.



Fracture
Localisation des épicentres de séismes détectés entre 1978 et 1987.



ZOOM



P. BOSSER DPTS/ENSG- LAREG/DTSI

Séisme
Déplacements horizontaux (flèches rouges) et verticaux (échelle de couleurs) de différentes stations du réseau GPS japonais.

GEOGRAPHICAL SURVEY INSTITUT



Le 11 mars 2011 à 14h50, juste après le séisme, une bonne partie du Japon s'était déplacée horizontalement de deux mètres, certaines zones de cinq. Toutes les stations, avec une ampleur dépendant de leur localisation, ont enregistré ces mouvements. «*La priorité de mon travail est d'obtenir la meilleure précision des mesures GPS autour du moment du séisme (quelques heures), pour extraire des perturbations infimes mais pouvant nous renseigner sur les mécanismes de génération de la rupture*», poursuit Pierre Bosser.

MIEUX ANTICIPER SÉISMES ET TSUNAMIS

Les signaux issus des mesures GPS sont multiples : des mouvements lents du sol, inférieurs au centimètre, survenant longtemps avant le séisme, et traduisant une activité sismique qui peut être éloignée d'une centaine de kilomètres ; des mouvements immédiats, que l'on repère mieux... lorsqu'il est déjà trop tard. Ou, piste plus récente, des perturbations de l'ionosphère : la vague de tsunami crée une onde atmosphérique qui monte vers le ciel. L'ascension jusqu'à l'ionosphère, à 300 km du sol, dure une dizaine de minutes. L'onde, pendant ce temps, est amplifiée jusqu'à 10 000 fois. Comment la repérer ? En temps ordinaire, l'ionosphère affecte déjà la transmission des ondes radio ou GPS qui la traversent. Les satellites, pour compenser les perturbations, émettent sur deux fréquences. Aux infimes décalages entre deux fréquences correspond une perturbation de l'ionosphère — par exemple celle créée par un tsunami. Un des objectifs du projet TO-EOS est donc d'évaluer si les « cartes » ainsi obtenues des perturbations de l'ionosphère permettent une détermination rapide (quelques minutes à quelques dizaines de minutes) de la localisation et de la magnitude

des séismes et tsunamis. En complément de la sismologie classique, ce type d'approche pourrait être mis en place à moindre coût (quelques stations GPS suffisent) et permettrait d'imager les phénomènes qui ont lieu en mer.

« RÉDUIRE LE BRUIT » DES SIGNAUX GPS

Dans l'imagerie de l'ionosphère ou dans la mesure des mouvements du sol, les données GPS ont un rôle crucial. Et elles ne seront jamais trop précises. Les satellites GPS sont des horloges atomiques volant à 20 000 km d'altitude et lancés à 14 000 km/h. Les signaux qu'elles émettent à destination des stations terrestres ou d'un récepteur de voiture, sont perturbés par l'ionosphère, par la troposphère (les couches basses et humides de l'atmosphère), parfois par les reliefs au sol. La vapeur d'eau les ralentit. La précision dépend aussi de l'environnement de la station, de la qualité du matériel et de celle des corrections opérées. Pour exploiter ces signaux d'une manière fine, il faut les corriger en permanence et concevoir des logiciels capables de traiter des données en masse. Il faut « réduire le bruit » des signaux pour augmenter leur précision, et détecter, sans erreur, les plus petits déplacements. Pierre Bosser a reçu des partenaires japonais du projet, seconde par seconde, les positions des 1200 stations japonaises quatre jours avant, pendant, et deux jours après le séisme. «*D'ordinaire, au Lareg, nous travaillons sur une position par jour ou par semaine. Là, nous estimons une position par seconde et par station, sans compter la prise en compte des effets de l'atmosphère.*»

La coordination de ces paramètres est « une véritable alchimie », dit Pierre Bosser. Après quatre essais logiciels, il pense avoir trouvé la

Déflagration

La région de Sanriku, après le passage du tsunami, le 11 mars 2011.

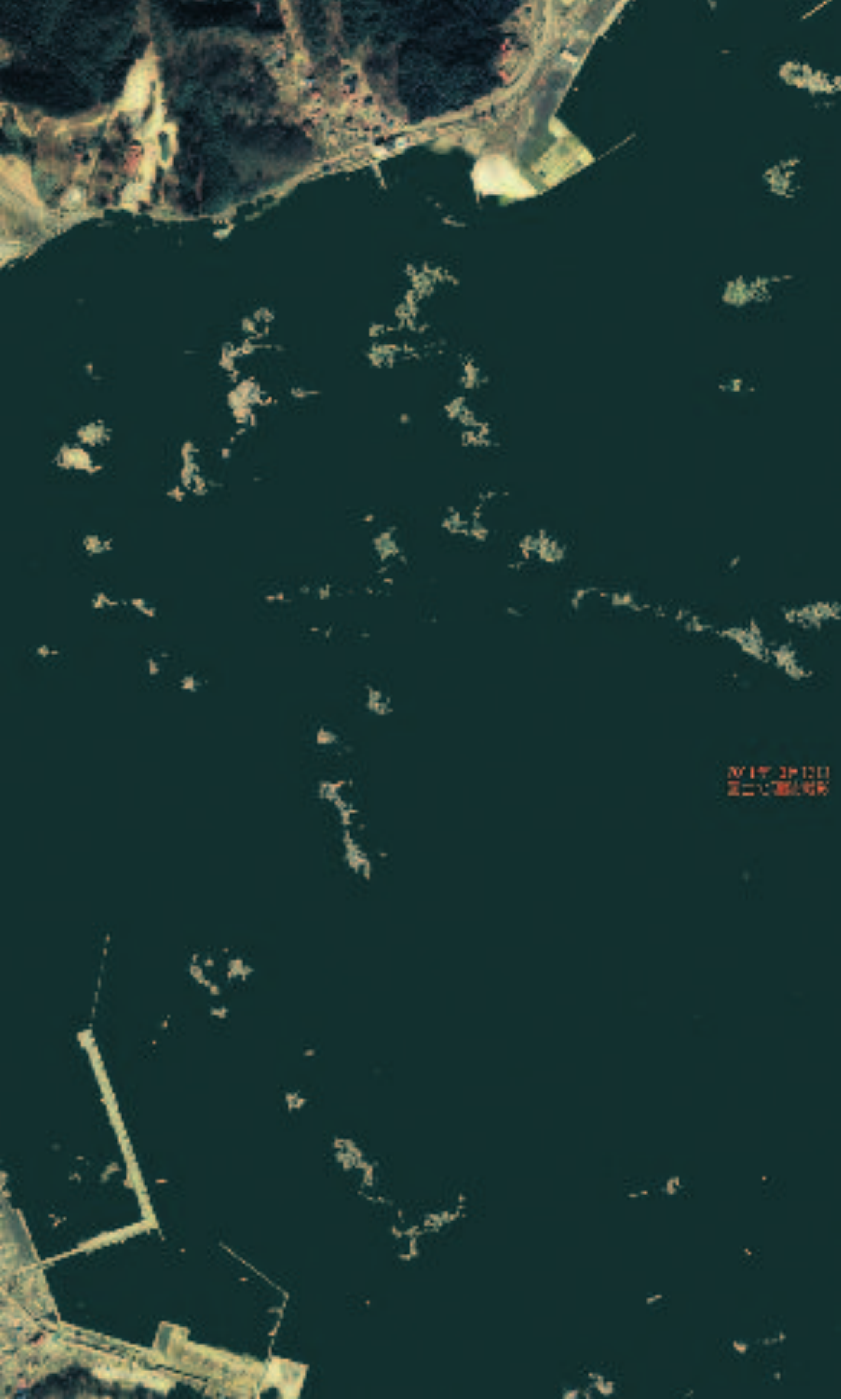
bonne recette, qui intègre un programme développé par la Nasa. «*D'ordinaire, le traitement est différentiel ou relatif: on calcule les différences entre les stations. Mais cela exige un temps de calcul trop important. Là, on utilise une méthode appelée PPP (pour positionnement ponctuel précis): on part de la localisation exacte des satellites pour étudier chaque point séparément, station par station.*»

Le procédé est performant : «*Le traitement est effectué sur le déphasage du signal, la différence entre le signal attendu et le signal observé. Lorsque l'on détermine une position par seconde, en mesure planimétrique, on obtient mieux que le cm: 8 à 10 mm; en vertical, on est toujours un peu moins bon, la mesure se fait à 15 à 20 mm.*» Les résultats sont ensuite communiqués à Géoazur, chargé de la base de données du réseau GPS permanent des laboratoires français Renag et à l'Institut de physique du globe de Paris.

UNE COURSE CONTRE LE TEMPS

Pierre Bosser a d'abord étudié les données des stations les plus proches de l'épicentre. «*J'ai reçu les données en mai. En juin, j'ai fourni une première solution, sur l'intervalle six heures avant / deux heures après le séisme*». Puis il a élargi son analyse aux autres stations, et agrandi la fenêtre temporelle en s'intéressant aux quatre jours ayant précédé et suivi le séisme. Une journée de données des 1200 stations pèse dix gigaoctets de données brutes.

L'analyse d'un jour de données, pour la détermination d'une position d'une station à chaque seconde, dure environ 60 minutes...



P. BOSSER DPTS/ENSG- LAREG/DTSI



Stations
Station du réseau GPS permanent (colonne de droite) et antenne VLBI (à gauche) du centre GSI à Tsubaka (Japon).

si l'on sait jongler avec les calculateurs pour réduire la durée des calculs. Des premières analyses qu'il a faites, Pierre Bosser a produit un schéma animé. Les déplacements des balises terrestres y sont représentés en temps réel (1 Hz) ou accéléré (10 Hz) par des flèches rouges s'allongeant jusqu'à l'insupportable vers le sud-est. Les ondes du séisme y atteignent le Japon, secouent sa côte Est, le déplacent de plusieurs mètres. Les couleurs marquent l'ampleur des déplacements. La station d'Osso, la plus proche de l'épicentre, fait un bond horizontal de 5,24 mètres vers l'est, s'enfonce verticalement de 1,21 mètre. Tout l'enjeu est de faire parler ces stations le plus précisément possible, sans que l'on sache encore ce qu'elles sont capables de révéler. L'étude des déplacements des stations avant le séisme a permis de mettre en évidence qu'une meilleure précision est encore nécessaire (lire interview). Celle des perturbations de l'ionosphère après le séisme, lisibles dans le déphasage des signaux GPS, est plus avancée. Le projet ANR TO—EOS est une course contre le temps. Il sera clos au printemps 2013. ■

« DÉGAGER DES SIGNAUX DEPOURVUS D'AMBIGUÏTÉS »

Quel usage faites-vous des données GPS que vous transmet Pierre Bosser ?

Classiquement, nous utilisons ce type de données pour caractériser les séismes, savoir quels mouvements ils ont engendrés, à quelle profondeur et sur quelle surface. Nous savons ainsi que le séisme de Tohoku-Oki a rompu une zone d'environ 100 × 400 km. Mais mon travail actuel sur cette partie consiste à réaliser une analyse critique de ces solutions GPS pour évaluer si de petits déplacements n'auraient pas eu lieu près de l'épicentre. Des déplacements lents, que les sismomètres n'auraient pas détectés. Le GPS est en effet très utile pour détecter des déplacements absolus et des mouvements lents, quand les sismomètres sont surtout sensibles aux déplacements relatifs et rapides.

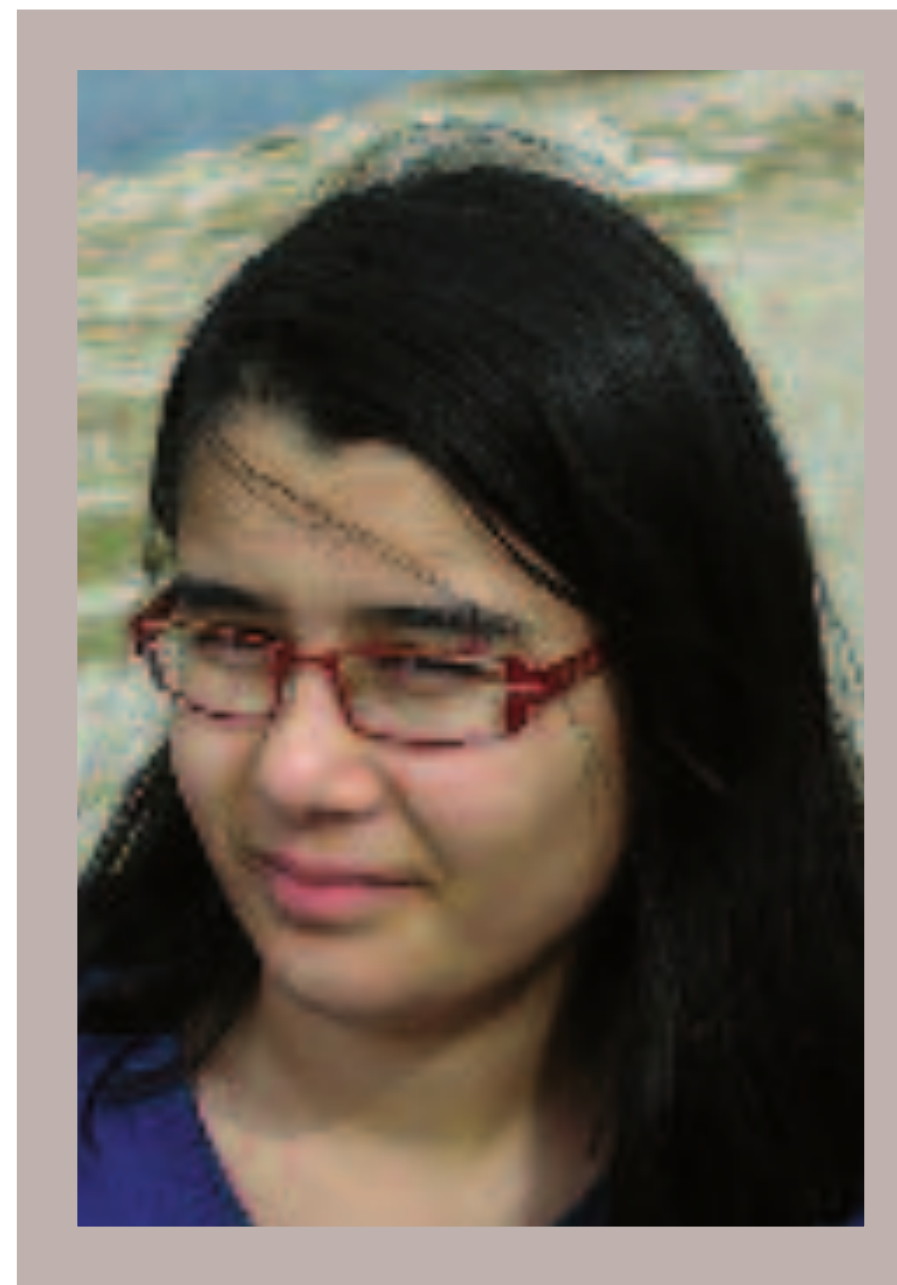
La précision du centimètre vous suffit-elle ?

Plus précis... c'est toujours mieux. Les points d'observation sont relativement éloignés de l'épicentre, ce qui a diminué — heureusement ! — l'impact du séisme sur le Japon et sur ses côtes. Si l'on imagine un séisme lent, il ne pourrait être détecté que par des mouvements inférieurs au centimètre, qui correspondraient à des mouvements de plusieurs dizaines de centimètres à l'épicentre. D'autres groupes de chercheurs essaient de détecter ces mouvements lents en utilisant des inclinomètres et une poignée de mesures en fond de mer. Ces dernières sont en plein développement mais restent difficiles à mettre en œuvre et sont très coûteuses.

Des trois pistes suivies par le projet de recherche, laquelle vous semble la plus prometteuse ?

La plus grande difficulté, c'est d'aller voir ce qui se passe avant un séisme, de dégager dans les enregistrements des stations au sol des signaux dépourvus d'ambiguïtés. Nous disposons de premiers indices, par exemple la présence d'une activité sismique importante avant le séisme, mais qui pourrait être aussi liée aux répercussions d'un séisme plus modéré survenu deux jours avant le séisme de Tohoku-Oki. C'est ce que nous

L. ROLLAND



3 questions à...

Lucie Rolland

Chercheuse post-doctorante à Géoazur (LINS-CNRS-IRD-OCA)

cherchons à établir...

En revanche, après le séisme, on observe une pléthore de perturbations. Nous avons publié un article avec l'Institut de physique du globe de Paris montrant qu'il est possible de tirer parti de la présence du réseau GPS japonais, pourtant situé à quelques centaines de kilomètres, pour sonder la région de l'ionosphère qui se trouve au-dessus de l'épicentre.

Il y a un délai de dix minutes : c'est le temps de montée des ondes atmosphériques jusqu'à 300 km d'altitude. On utilise les ondes radio du GPS pour produire des images. Nous l'avons observé au moment du séisme de Tohoku-Oki comme on l'observe habituellement pour les séismes de magnitude supérieure à 7 depuis dix ans. Au Japon, on a pu voir avec une précision inégalée ce qui s'est produit au-dessus de l'épicentre. Il suffit d'avoir une station à moins de 100 km et un satellite qui passe au bon endroit. Avec les futurs systèmes de navigation européen Galiléo ou japonais QZSS, nous travaillons dans la perspective d'une mise à disposition de nouveaux récepteurs, et d'une couverture de plus en plus importante de mesures au sol et dans l'ionosphère. Nous cherchons donc à exploiter ces informations pour mieux caractériser les séismes. Certes, les ondes atmosphériques ne vont pas plus vite que les ondes sismiques, qui ont touché le Japon en quelques secondes, mais elles pourraient contribuer à mieux estimer la magnitude, un paramètre crucial pour évaluer la dangerosité d'un séisme.

La première alerte sismique au Japon annonçait une magnitude de 7,9, quand elle a été de 9, soit 50 fois plus importante. On a sous-estimé la magnitude comme on a sous-estimé la hauteur des vagues qui allaient toucher les côtes. Les mesures dans l'ionosphère auraient certainement permis d'estimer une magnitude supérieure à 7.9. Elles sont en plein développement, et intègrent l'étude des signaux GPS. Néanmoins, elles ne seront utilisées qu'en complément des sismomètres classiques. ■