

premier temps par les données sismiques. Ces données en mer, indispensables, ont poussé les autorités japonaises à intensifier, depuis 2011, leurs investissements dans des systèmes de câbles sous-marins de plusieurs milliers de kilomètres, déployés près des zones de subduction, équipés de plus de 200 capteurs sismiques et capteurs de pression.

À terre aussi, la densité des réseaux sismiques et de capteurs GNSS permet au Japon d'être très performant sur l'alerte précoce. Couplées aux données en mer, ces observations aident à caractériser très rapidement le séisme et l'amplitude du tsunami.

D'ici peu, les centres d'alerte, au Japon et ailleurs, recevront des informations supplémentaires recueillies dans les plus hautes couches de l'atmosphère (voir l'encadré page 37). Des mesures satellitaires contribueront également à cerner rapidement la nature des déformations de la croûte terrestre. Ensemble, ces nouveaux jeux de données apporteront dans la prochaine décennie une meilleure connaissance d'un tsunami en temps réel.

L'alerte aux tsunamis reste néanmoins un défi lorsqu'ils sont provoqués par des éruptions volcaniques ou des glissements de terrain (voir l'encadré page ci-contre). Certains volcans sont désormais dotés de systèmes locaux de détection, notamment le Stromboli, en Italie, depuis

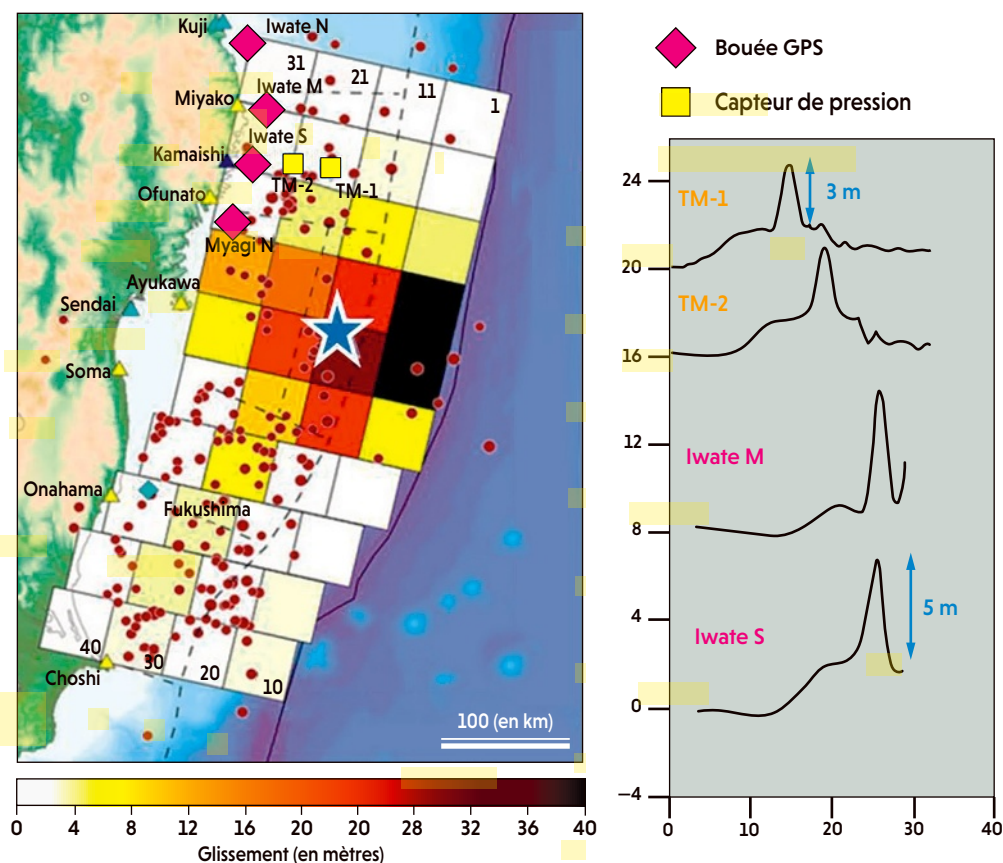
un tsunami important en 2002. Mais équiper l'ensemble des volcans menaçants est très coûteux au regard de la rareté des tsunamis atypiques qu'ils génèrent. Le système d'alerte de la Caraïbe a néanmoins émis des recommandations pour intégrer les sources volcaniques dans les procédures d'alerte, en lien avec les observatoires volcanologiques.

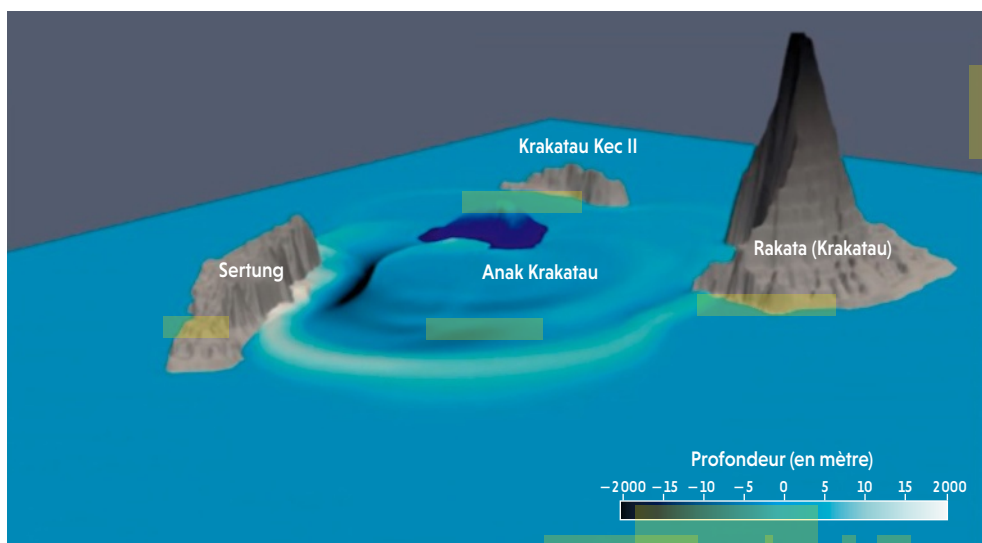
Les trois piliers indispensables des systèmes d'alerte sont toujours : l'évaluation de l'aléa et du risque ; la surveillance et l'alerte ; la prévention. Si les initiatives internationales ont contribué à renforcer chacun de ces piliers depuis 2004, la réussite nécessite, nous l'avons vu, des efforts permanents aux échelles locales de décision et de préparation. Des progrès sont aussi attendus du côté de la modélisation.

L'AIDE DES MODÈLES

De fait, les simulations numériques des tsunamis s'améliorent notablement. Elles livrent des modèles toujours plus précis et rapides, reproduisant par exemple des tsunamis historiques ou récents (voir la figure page suivante). Les spécialistes peuvent aussi les comparer à des données marégraphiques et se projeter dans des scénarios futurs. Les modélisations, menées en cours d'alerte, sont également de plus en plus utilisées pour prévoir les effets à distance dès qu'un séisme tsunamigénique se

Le tsunami du 11 mars 2011, au Japon, a été détecté dans les dizaines de minutes qui ont suivi le séisme, d'abord par des capteurs de pression au fond de la mer (TM-1 et TM-2), puis par les bouées équipées de capteur GPS plus près des côtes (Iwate M et S). Les signaux révèlent comment l'amplitude du tsunami augmente en s'approchant de la côte. À gauche, le long de la zone de subduction, les données géophysiques donnent un aperçu du glissement le long de la faille, pendant le séisme, atteignant localement 40 mètres.





Une simulation du tsunami né de l'effondrement du volcan indonésien Anak Krakatau en décembre 2018.

➤ produit: c'est le cas aujourd'hui pour les tsunamis surveillés par le laboratoire de géophysique de Polynésie française.

Pour de bonnes performances, certaines données sont indispensables, comme la profondeur d'eau en tout point du domaine étudié et les caractéristiques physiques précises des sources, qu'il s'agisse d'un effondrement ou d'un séisme. Grâce à elles, on peut modéliser précisément les zones côtières exposées à des inondations et définir les zones d'évacuation et de refuge.

Les modèles apportent des éléments pour que les autorités des littoraux, de plus en plus exposés sur le plan démographique ou économique, et dans un contexte de montée du niveau marin, puissent agir. Avec l'appui des modèles, la préparation passe également par l'éducation, la sensibilisation et l'anticipation grâce à des exercices répétés.

Les hypothèses retenues dans les modèles doivent aussi refléter les connaissances interdisciplinaires, et aller au-delà des modèles consensuels. Ainsi, avant le séisme du Tōhoku du 11 mars 2011 (de magnitude 9,1), les modèles réalisés au Japon dans les années 1990 et 2000 n'envisageaient pas que la magnitude d'un séisme de subduction puisse atteindre 9. Pourtant, la découverte à cette même époque de dépôts anciens, dans les sols, montrait que seuls des séismes de magnitude 9 pouvaient expliquer des inondations extrêmes dans la plaine de Sendai (à 300 kilomètres au nord-est de Tokyo) au IX^e siècle... De tels événements s'étaient manifestement déjà produits, mais n'avaient pas été pris en compte pour la prévention.

Plus généralement, les tsunamis de 2004 et 2011 imposent désormais de considérer toute subduction comme tsunamigénique. En outre, un système mondial d'alerte ne doit négliger aucune région. En dehors du Pacifique, nous avons vu que bien d'autres zones sont exposées, à commencer par la Méditerranée, touchée

plusieurs fois par des événements majeurs: à la Crète en 365 que nous avons citée, ajoutons Alger en 1365, la Sicile et la Calabre en 1908... Et dans les régions moins documentées sur la durée, des événements sont connus, liés à une activité tectonique ou volcanique soutenue, comme celles de la montagne Pelée en 1902 ou de la République dominicaine, en 1946.

LE MONDE ENTIER À LA LOUPE

De nouvelles régions propices à l'aléa tsunami émergent également, comme le Groenland, où la montée des températures a favorisé en 2000 et 2017 deux glissements de terrain dans des fjords. Déclenchés à près de 1000 mètres d'altitude, ils ont entraîné des tsunamis qui ont détruit deux villages éloignés, faisant plusieurs victimes. L'activité tectonique et volcanique terrestre crée aussi de nouvelles zones à risques, comme à Mayotte (voir l'entretien page 20), où le volcan découvert en 2019 reste potentiellement tsunamigénique et mérite à ce titre d'être surveillé, sur un archipel exposé par ailleurs aux tsunamis de l'océan Indien.

Les progrès dans les technologies de mesure sont indéniables et améliorent la prévention. Cependant, des efforts restent à poursuivre pour déployer des capteurs, cartographier les failles sous-marines méconnues, et préparer les populations et autorités de manière optimale. Comme toujours dans la prévention des risques, les investissements à réaliser sont à comparer aux coûts induits lorsque les catastrophes surviennent et que les scientifiques reviennent pour rappeler qu'un tsunami majeur était prévisible. La décennie qui s'ouvre, dédiée par les Nations unies aux sciences océaniques au service du développement durable, devrait inciter à des études d'aléa et de risque dans toutes les zones potentiellement exposées, et à renforcer significativement l'ensemble des moyens d'observation, de surveillance et d'alerte. ■

Les auteurs remercient AUDREY GAILLER et PHILIPPE HEINRICH, du CEA, pour leur contribution à cet article

BIBLIOGRAPHIE

- F. MANTA ET AL., Rapid identification of tsunamigenic earthquakes using GNSS ionospheric sounding, *Scientific Reports*, vol. 10, art. 11054, 2020.
- H. HÉBERT ET AL., Contributions of space missions to better tsunami science: observations, models and warnings, *Surveys in Geophysics*, vol. 41, pp. 1535-1581, 2020.
- A. PARIS ET AL., The December 22, 2018 Anak Krakatau, Indonesia, landslide and tsunami: preliminary modeling and results, *Pure and Applied Geophysics*, vol. 177, pp. 571-590 2020.
- F. SCHINDELÉ ET AL., Implementation and challenges of the Tsunami Warning System in the Western Mediterranean, *Pure and Applied Geophysics*, vol. 172, pp. 821-833, 2015.
- A. JAMELOT ET D. REYMOND, New tsunami forecast tools for the French Polynesia Tsunami Warning System Part II: numerical modelling and tsunami height estimation, *Pageoph*, vol. 172, pp. 805-819, 2015.
- R. PARIS, Source mechanisms of volcanic tsunamis, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 373, art. 20140380, 2015.