

passant par les autorités régionales et communales, prend du temps et nécessite des décisions politiques fortes, des arrêtés, la mise en place d'un plan Orsec (pour Organisation des secours)... et implique de nombreuses personnes. Or beaucoup de ces maillons, dont une partie des autorités, ne s'attendent pas à être confrontés à des tsunamis en Méditerranée, ignorant qu'il y en a eu par le passé. Ce manque cruel de sensibilisation met du temps à être comblé, mais la situation s'améliore.

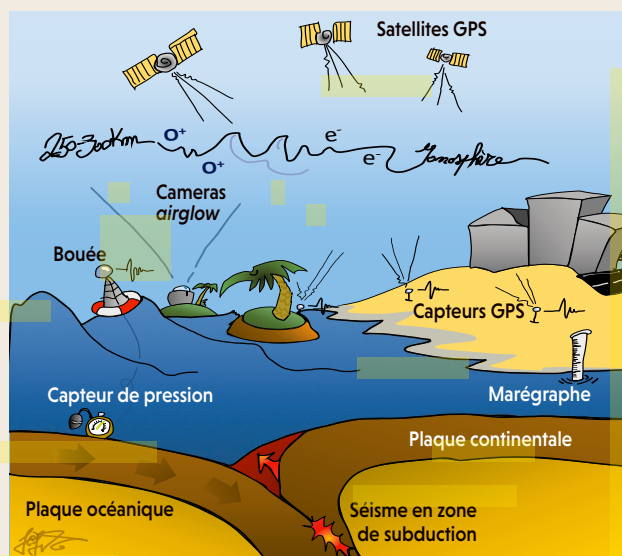
Jusqu'en 2004, seul l'océan Pacifique était couvert par un système d'alerte, coordonné par un groupe intergouvernemental de coordination (GIC) établi par la commission océanographique intergouvernementale (COI) de l'Unesco en 1965, et visant à alerter les États

en cas de séisme majeur, source d'un éventuel tsunami. Après la catastrophe de Sumatra, en 2004, déclenchée par un séisme exceptionnel de magnitude 9, la COI a établi dès juin 2005 trois nouveaux GIC, pour couvrir l'océan indien, les Antilles, l'Atlantique nord-est, la Méditerranée et les mers adjacentes, ainsi qu'un groupe mondial. Ces GIC définissent l'architecture des systèmes d'alerte, les mettent en place et incitent tous les États membres à y contribuer.

Les avancées majeures concernent la gouvernance et la chaîne d'alerte. La plupart des pays ont nommé des organismes chargés de recevoir les alertes et de les transmettre aux autorités de sécurité civile. En France, le Centre national d'alerte aux tsunamis (Cenalt), qui couvre >

LES TSUNAMIS VUS DU CIEL

Pour mieux être en mesure d'alerter les populations à temps, les tsunamis nécessitent d'être surveillés par des réseaux de capteurs de plus en plus denses. Pour compléter les techniques classiques d'observation et d'estimation du risque, une nouvelle discipline est née à l'institut de physique du globe de Paris: la sismologie ionosphérique. Cette nouvelle branche de la sismologie se base sur l'observation des perturbations générées par les séismes et les tsunamis dans l'ionosphère, la haute partie de l'atmosphère terrestre entre 80 et 1000 kilomètres d'altitude où, sous l'effet des radiations solaires, les molécules neutres sont partiellement ionisées et forment un plasma d'ions et d'électrons. Lors de forts séismes, le déplacement vertical de l'eau au niveau de l'épicentre ou à grande distance par la propagation du tsunami, crée des ondes de gravito-acoustiques, c'est-à-dire un mélange d'ondes acoustiques et



d'ondes de gravité. Ces dernières se distinguent premières en ce qu'elles sont produites par le déplacement d'une masse, sans compression. À mesure qu'elles s'élèvent dans l'atmosphère, toutes ces ondes sont fortement amplifiées par la diminution de la densité de l'air. Leur interaction avec l'ionosphère provoque de fortes variations de la vitesse et de la densité du plasma, observables par diverses techniques. Par exemple, on peut utiliser

le contenu électronique total (TEC), c'est-à-dire le nombre d'électrons rencontrés par le signal échangé entre un récepteur et un satellite GPS, ou bien par des caméras dites *airglow* mesurant la densité d'ions O^+ estimée en mesurant le nombre de photons produits par la recombinaison de l'oxygène à grande altitude. On accède ainsi à la signature du tsunami sur une extension spatiale jamais atteinte par des capteurs ponctuels dans l'océan.

Le suivi des événements de Sumatra, en Indonésie, en 2004, et de Tōhoku, au Japon, en 2011, a validé le principe du sondage ionosphérique pour visualiser la genèse (seulement 8 minutes après la rupture) et la propagation du tsunami (dès 40 minutes après la rupture) dans les régions océaniques non couvertes par d'autres capteurs. On a évalué le potentiel tsunamigénique de la rupture sismique et estimé l'amplitude du tsunami avec une précision encourageante. En 2018, nous avons proposé de définir une nouvelle magnitude, la « magnitude ionosphérique » afin de quantifier une observation sismologique par l'observation de l'ionosphère. Ces résultats ouvrent de nouvelles perspectives: avec le soutien du Cnes, nous envisageons d'embarquer une caméra *airglow* sur un satellite pour couvrir l'ensemble des océans et compléter les instruments déployés au sol ou en mer.

GIOVANNI OCCHIPINTI
chercheur à l'institut de
physique du globe de Paris.

> l'Atlantique nord-est et la Méditerranée occidentale, est l'un des onze centres d'alerte aux tsunamis au niveau international. Le Japon est un exemple dont on peut tirer quelques enseignements.

LES LEÇONS DU JAPON

Le 11 mars 2011, un tsunami a dévasté toutes les villes portuaires du nord-est de l'archipel, et gravement endommagé la centrale nucléaire de Fukushima, où la menace avait été sous-évaluée. Mais le tsunami a causé beaucoup

moins de victimes qu'en 2004, illustrant le bon fonctionnement d'un système développé dès les années 1950, capable de détecter rapidement le séisme, d'évaluer le tsunami et d'alerter des populations bien entraînées à ce risque.

En particulier, les capteurs de pression immergés et les bouées GNSS en surface ont repéré très précisément le tsunami une vingtaine de minutes après le séisme (voir la figure page suivante). L'amplitude de plusieurs mètres des vagues au large, un record, a conduit à augmenter le niveau d'alerte sous-estimé dans un

DES TSUNAMIS VOLCANIQUES

Au soir du 22 décembre 2018 le volcan Anak Krakatau (voisin du Krakatau), en Indonésie, crache de la lave visible depuis les plages de Java, à 40 kilomètres. Soudain, vers 21 heures, un panache de cendres obscurcit le ciel. Et une demi-heure plus tard, des vagues de plusieurs mètres de hauteur dévastent les côtes de Java, puis de Sumatra, faisant plus de 430 victimes. Des centaines de maisons et de bateaux sont détruits. Les études ont depuis montré que le volcan avait été biseauté par un glissement de terrain de plus de 150 millions de mètres cubes de roches, dont l'entrée en mer a provoqué le tsunami.

Ces tsunamis dits «volcaniques», moins fréquents que leurs homologues sismiques, représentent un défi, car les centres d'alerte ne les prennent pas en compte. De plus, les observatoires volcanologiques sont rarement équipés pour surveiller la formation de vagues inhabituelles autour des volcans. Enfin les autorités et les populations locales ne sont pas sensibilisées à ce risque. Autant de facteurs qui



Le Stromboli, en Italie, juste avant le glissement de terrain du 30 décembre 2002.

accentuent la dangerosité de ce type de tsunamis. Ils ne sont pourtant pas inconnus. Un seul exemple, en août 1883, une éruption cataclysmique du Krakatau a engendré des tsunamis pendant plusieurs jours. Au paroxysme, le panache de cendres et de roches s'élevant à plus de 40 kilomètres d'altitude s'est écroulé sur lui-même, provoquant un tsunami de 15 mètres sur les côtes du détroit de la Sonde. Bilan: 30 000 morts. Les écoulements au sens large sont responsables de la majorité des tsunamis volcaniques. Lors de l'entrée dans l'eau, le transfert d'énergie produit une vague d'impulsion suivie de vagues secondaires. Cette vague initiale atteint

parfois plusieurs centaines de mètres de hauteur dans le cas de mégaglislements d'îles océaniques. La différence principale entre les vagues générées par les glissements de terrain et celles dues à des séismes se situe à la source: les premières sont caractérisées par une forte amplitude initiale avec des longueurs d'onde modestes. La conséquence est un impact plus localisé. D'autres mécanismes sont possibles, notamment dans le cas des volcans immergés. Lorsque le magma entre en contact avec l'eau à faible profondeur, des explosions percent parfois la surface de l'eau, formant un «cratère» qui ensuite se soulève puis s'effondre. Les vagues formées se propagent de façon radiale autour

de l'explosion. Un tel phénomène a été observé en 1996 dans le lac Karymsky, en Russie. Les effondrements de caldeiras sous-marines sont aussi susceptibles de générer des tsunamis, mais il n'existe aucun cas avéré. La compréhension des tsunamis liés à l'activité et l'instabilité des volcans a beaucoup progressé. Mais l'exemple de l'Anak Krakatau en 2018 pointe des lacunes en matière de prévention. Le tsunami généré par un effondrement du flanc nord du Stromboli en 2002 avait incité les Italiens à établir un dispositif de vigilance et d'alerte sur ce volcan qui figure déjà parmi les plus surveillés du monde. Deux balises flottantes équipées de capteurs de pression hydrostatique reliés à un système de positionnement par satellite sont venues compléter les nombreux équipements disposés sur le volcan: en 2019, ils ont enregistré les deux tsunamis induits par des écoulements.

RAPHAËL PARIS
chercheur au laboratoire
Magmas et volcans, à
l'université Clermont-Auvergne.