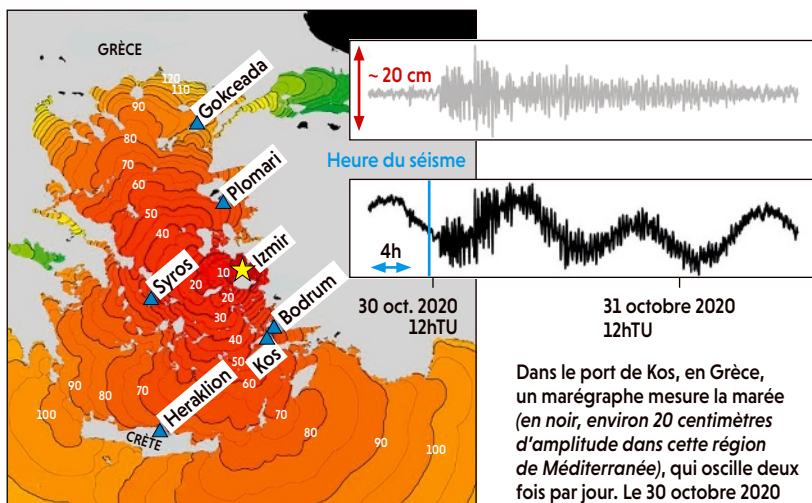
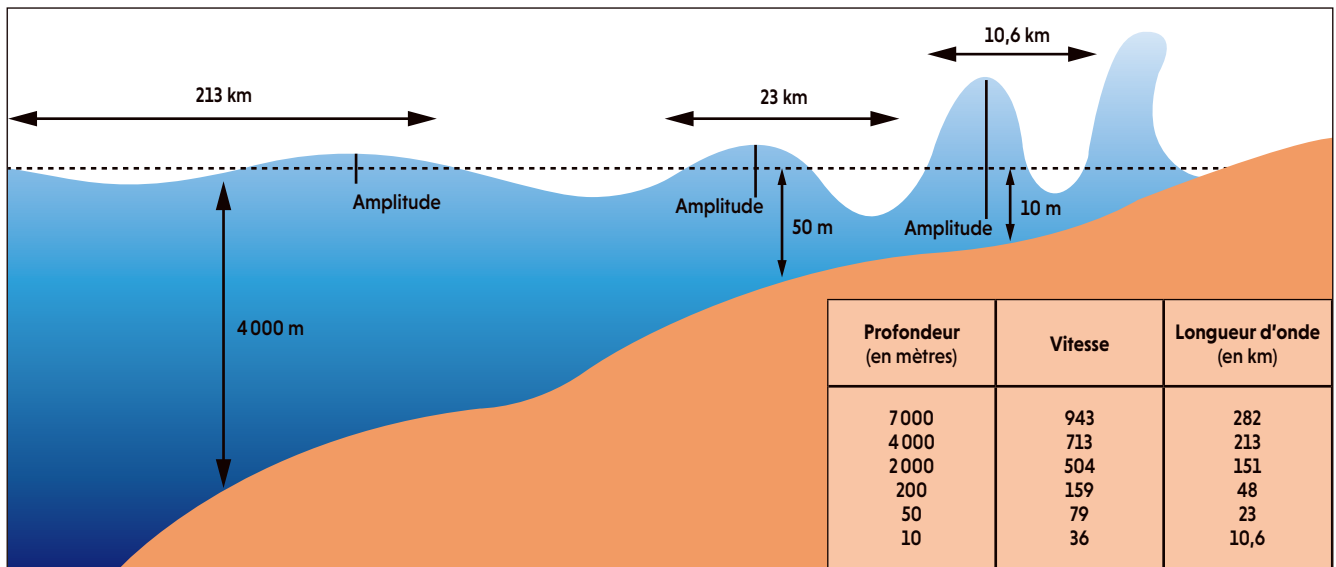




Un tsunami est un train d'ondes qui met en mouvement toute la colonne d'eau, du fond à la surface et transportant beaucoup d'énergie. À grande profondeur, les vagues se propagent à grande vitesse, ont une grande longueur d'onde et une faible amplitude. En se rapprochant des côtes, la profondeur diminue entraînant un ralentissement de l'onde, la diminution de sa longueur d'onde et son amplification jusqu'au déferlement.

de la mer auparavant? Combien de vagues se sont succédées? Quelle est la période, c'est-à-dire le temps écoulé entre deux vagues? Quelle fut la hauteur de vague maximale? Plus encore, ils accèdent aux paramètres de référence d'un tsunami: le *run-up* (l'altitude maximale de déferlement), la profondeur maximale d'inondation et les lieux les plus impactés.

Avec tous ces éléments, les spécialistes repèrent les sites (baies, ports...) plus sensibles au tsunami que d'autres, identifient les zones à évacuer en priorité et au final renforcent et affinent les systèmes d'alerte.

ALERTE AU TSUNAMI

En Méditerranée, les premiers systèmes d'alerte ont été établis à partir de 2005, et, depuis, six événements sur des failles peu connues ont impacté les côtes grecques, italiennes et turques. Sans les réseaux de surveillance et ce système d'alerte, ces tsunamis seraient passés inaperçus. Le risque de tsunami en Méditerranée est ainsi mieux évalué aujourd'hui, mais l'alerte aux populations n'est pas encore complètement fonctionnelle. Pour quelles raisons? La question est cruciale au cas où un tsunami catastrophique comme celui de l'an 365 en Crète venait à se produire aujourd'hui, menaçant de dévaster tout l'est de la Méditerranée avec des impacts autrement plus dévastateurs qu'au IV^e siècle.

La mise en place de l'alerte descendante, des centres d'alerte jusqu'au grand public en

➤ «tsunamimètres» sont cruciaux pour suivre la propagation du tsunami et anticiper ses impacts. Citons aussi des bouées associées à un «système de positionnement par satellite» (les bouées dites GNSS, pour géolocalisation et navigation par un système de satellites), qui mesurent précisément les oscillations de la mer.

Ces instruments innovants ont mis en lumière la complexité des tsunamis. Ainsi, l'analyse des données des capteurs de pression a montré la dispersion spectaculaire des tsunamis, c'est-à-dire le fait que les ondes les plus courtes du tsunami arrivent bien plus tard que celles de plus grandes longueurs d'onde.

En complément des mesures physiques de plus en plus détaillées et précises, mais souvent trop rares, des enquêtes de terrain sont riches d'informations. Ainsi, après le tsunami d'octobre 2020 en mer Égée, grâce aux témoignages des habitants et à quelques vidéos complétant les mesures, les experts ont eu accès à plusieurs informations importantes. À quelle heure est arrivée la première vague? Y a-t-il eu un retrait

Dans le port de Kos, en Grèce, un marégraphe mesure la marée (en noir, environ 20 centimètres d'amplitude dans cette région de Méditerranée), qui oscille deux fois par jour. Le 30 octobre 2020 s'est superposé un tsunami (né d'un séisme de magnitude 7 au large d'Izmir, en Turquie) dont on peut isoler le signal (en gris). Son oscillation là aussi d'environ 20 centimètres d'amplitude s'atténue au cours du temps, mais dure au moins 24 heures.

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.

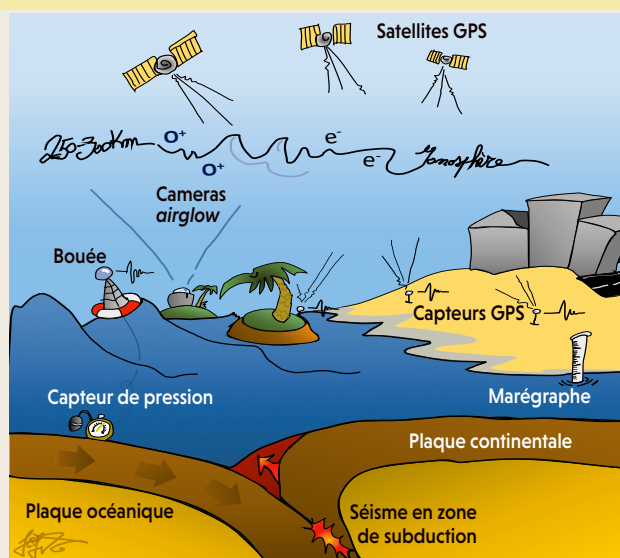
Jusqu'en 2004, seul l'océan Pacifique était couvert par un système d'alerte, coordonné par un groupe intergouvernemental de coordination (GIC) établi par la commission océanographique intergouvernementale (COI) de l'Unesco en 1965, et visant à alerter les États

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.