



Retour sur 20 ans de mesures marégraphiques pour la surveillance des tsunamis et l'alerte opérationnelle

■ Hélène HÉBERT

Un tsunami est un train de vagues océaniques déclenché majoritairement suite à un séisme sous-marin, une éruption volcanique, un éboulement de roches dans l'eau. Très observés dans le Pacifique où ils sont plus fréquents, les tsunamis se produisent dans la plupart des mers et océans où la géologie est active. Peu détectable au large, où leur amplitude est de quelques centimètres, la dangerosité des tsunamis se manifeste lors des amplifications à la côte, où ils peuvent être catastrophiques, et où les marégraphes sont les instruments privilégiés pour les détecter et les mesurer. Cet article montre plusieurs exemples de tsunamis enregistrés par des marégraphes, puis ouvre sur des perspectives de moyens futurs d'observation au large de ces phénomènes. Les tsunamis sont surveillés, pour les autorités, par des centres d'alerte dédiés, tel en France le Cenalt (Centre national d'alerte aux tsunamis), opérationnel au CEA depuis 2012 vis-à-vis des côtes méditerranéennes et atlantiques de la France, et qui s'appuie sur des données des marégraphes mises à disposition par le Shom dans ce cadre, et partagées avec les autres centres d'alerte internationaux.

MOTS-CLÉS

Nivellement de haute précision, NIREF, référence verticale, marégraphie

Introduction sur l'aléa tsunami

Les grands séismes sous-marins provoquent en quelques minutes des déformations importantes du fond de la mer, qui peuvent déclencher des tsunamis, d'autant plus forts si la magnitude est grande et si la rupture sismique est peu profonde dans la croûte. Les trains de vagues générés peuvent se propager sur plusieurs milliers de kilomètres, pendant plusieurs heures. Parfois, les vagues, relativement atténuées pendant la propagation, sont réamplifiées sur des côtes très éloignées de la source. Ces différentes étapes décrivent la vie d'un tsunami, depuis sa source jusqu'à son amplification à la côte, où s'exprime sa dangerosité, parfois responsable de catastrophes [1], [2].

Les tsunamis peuvent aussi être provoqués par des phénomènes volcaniques, ou par des glissements de terrain impactant la couche d'eau. Généralement, dans ce cas, l'atténuation au cours

de la propagation est nettement plus marquée, les amplitudes décroissent plus vite, rendant les effets à distance beaucoup moins considérables, mais souvent majeurs près de la source.

Les zones sources de séismes "tsunamigéniques" se retrouvent dans la plupart des mers et océans, le plus fréquemment dans le Pacifique (les grandes subductions autour de l'océan, plusieurs fois à dizaines de fois par siècle), mais aussi, moins fréquemment, dans l'océan Indien, aux Antilles, au large de la péninsule ibérique et dans toute la Méditerranée.

Le point commun de tout tsunami est son amplification à la côte, après une phase de propagation de quelques minutes à plusieurs heures, voire plus d'une journée dans les grands océans. Le tsunami est généralement de faible amplitude au large, mais est observable, mesurable, à la côte, sur les plages, dans les ports, et s'il est suffisamment fort, sur les falaises. Comme le train d'ondes se propage pendant

plusieurs heures, les effets côtiers sont des successions de surcotes et de décotes qui peuvent durer plus de 24 heures, toutes les 5 à 40 minutes suivant les cas. Dans les cas majeurs, cela conduit à des retraits de la mer parfois au-delà de la marée basse, alternant avec des montées de la mer pouvant atteindre plusieurs mètres verticalement, l'ensemble provoquant les dégâts dans les ports, sur les plages et sur le littoral.

Les instruments mesurant directement les tsunamis à la côte sont les marégraphes déployés dans les ports, qui permettent avant tout de mesurer la marée océanique, ainsi que l'évolution du niveau de la mer sur de longues durées, par exemple dans le cadre du changement climatique. Ces mesures reflètent une observation ponctuelle dans un port, mais pas toujours les amplitudes des effets du tsunami sur les rivages autour, qui les excèdent parfois largement.

Dans ce qui suit, plusieurs exemples illustrent l'apport de ces données pour comprendre les tsunamis. Les mesures au large sont aussi aujourd'hui de plus en plus accessibles, avec des capteurs de pression au fond de la mer, rendant possible la mesure des tsunamis avant leur arrivée à la côte, perspective intéressante pour le suivi par les systèmes d'alerte.

Comment mesurer et analyser un tsunami sur un marégramme

Avant 2004, les réseaux marégraphiques du Pacifique étaient souvent bien adaptés pour mesurer les tsunamis. Par exemple, le séisme du 25 septembre 2003 au Japon





(magnitude 8,3) a provoqué un tsunami de 4 mètres localement, très destructeur, qui s'est ensuite propagé dans le Pacifique. En Polynésie française, les îles Marquises sont très sensibles à l'amplification des tsunamis, et le tsunami y est arrivé une douzaine d'heures après le séisme. La *figure 1* illustre l'arrivée de ce tsunami, superposée à l'onde de marée représentée pendant 24 heures, mesuré par le marégraphe de Taiohae à Nuku Hiva (îles Marquises, Polynésie française), opéré par l'Université d'Hawaï. Le tsunami, bien détectable, et modéré (environ 0,2 mètre crête à creux, si on filtre la marée), n'a pas fait de dégâts significatifs.

La même année, le 21 mai 2003, un fort séisme (magnitude 6,8) s'est produit au large de Boumerdès (Algérie). De faible profondeur et provoquant suffisamment

de déformation verticale du fond de la mer, ce séisme a déclenché un tsunami qui a provoqué des dégâts importants sur plusieurs côtes méditerranéennes (Baléares, Côte d'Azur), atteignant 2 à 3 mètres d'amplitude [3]. Les données marégraphiques disponibles sont contrastées dans l'ouest de la Méditerranée. Par exemple (*figure 2*), le marégraphe dans le port de Sant Antoni (Ibiza, Baléares) y a enregistré une amplitude de 2 mètres environ, reflétant l'impact très marqué aux Baléares où plusieurs quais ont été inondés. Le marégraphe de Nice a enregistré un signal peu détectable, d'une amplitude de quelques centimètres. L'appareil de l'époque, déjà numérique, ne produisant que des données intégrées et restituées toutes les 10 minutes, contre 2 minutes à Sant Antoni, la mesure ne permet

pas de montrer la complexité du train d'ondes tsunami, dont la période était de 10 à 20 minutes. Sur les côtes françaises proches, le tsunami a provoqué des variations du niveau de la mer d'au moins 1 à 2 mètres, par exemple dans le port de la Figueirette (Alpes-Maritimes) qui s'est vidé à plusieurs reprises [3].

La simulation numérique est un outil privilégié pour expliquer les observations marégraphiques. Elle s'appuie sur de nombreux paramètres dépendant principalement des caractéristiques sismologiques, mais aussi sur des modèles bathymétriques décrivant la profondeur d'eau en tout point de la propagation, y compris en détail dans les ports et les baies (maille de 5 à 20 mètres si possible). Ces études permettent de comprendre des événements passés, comme pour le tsunami déclenché par le séisme d'El Asnam en Algérie en 1980 (*figure 3*), où différents modèles de séisme source sont testés [5].

Extension depuis 2004 des systèmes d'alerte aux tsunamis

Suite à la catastrophe du tsunami de l'océan Indien déclenché par le séisme de Sumatra (Indonésie, magnitude 9,2), le 26 décembre 2004, la situation des réseaux marégraphiques a considérablement évolué pour ce qui concerne les tsunamis.

© D. Reymond, Centre Polynésien de Prévision des Tsunamis à Tahiti

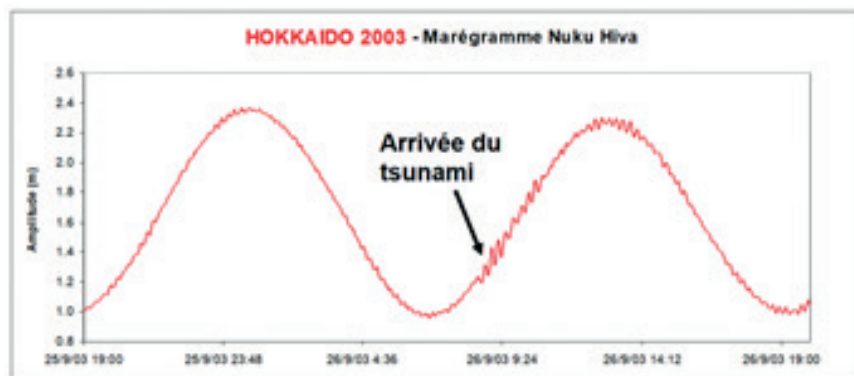


Figure 1. Marégramme à Taiohae (Nuku Hiva, îles Marquises) mesuré lors du tsunami provenant de Hokkaido (Japon) en septembre 2003. L'amplitude de la marée est de 1,40 m environ, celle du tsunami n'excède pas 0,15 à 0,20 m et s'exprime ici pendant au moins 6 heures.

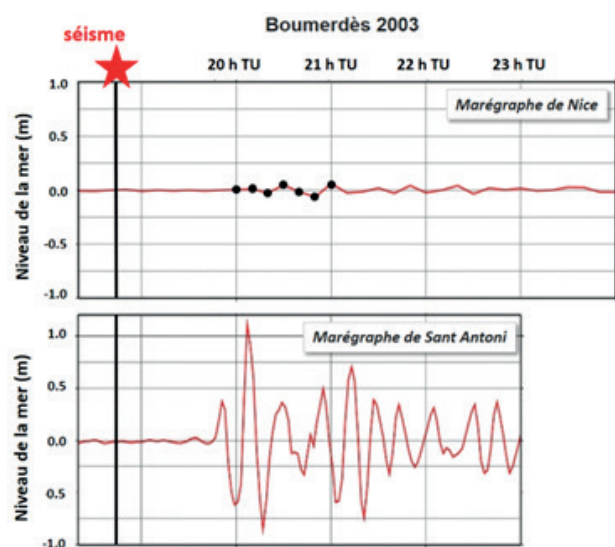


Figure 2. Marégrammes à Nice et à Sant Antoni lors du tsunami du 21 mai 2003 en Méditerranée occidentale, après le séisme de Boumerdès. Les données ont été filtrées de la marée pour ne conserver que le signal tsunami (échantillonnage 2 min à Sant Antoni, 10 min à Nice) (d'après [4]).

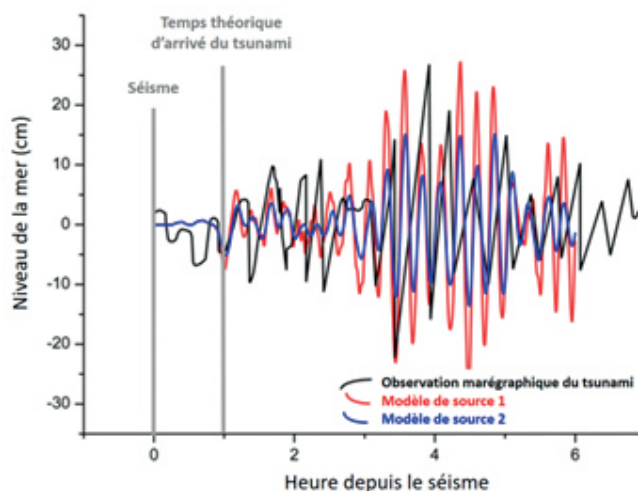


Figure 3. Marégramme dans le port d'Alicante (Espagne) (en noir), filtré de la marée, après le séisme d'El Asnam (magnitude 7,3) du 10 octobre 1980. Les deux modèles testés ici (rouge et bleu) permettent d'ajuster certaines caractéristiques du tsunami et de discuter des paramètres du séisme (adapté de [5]).

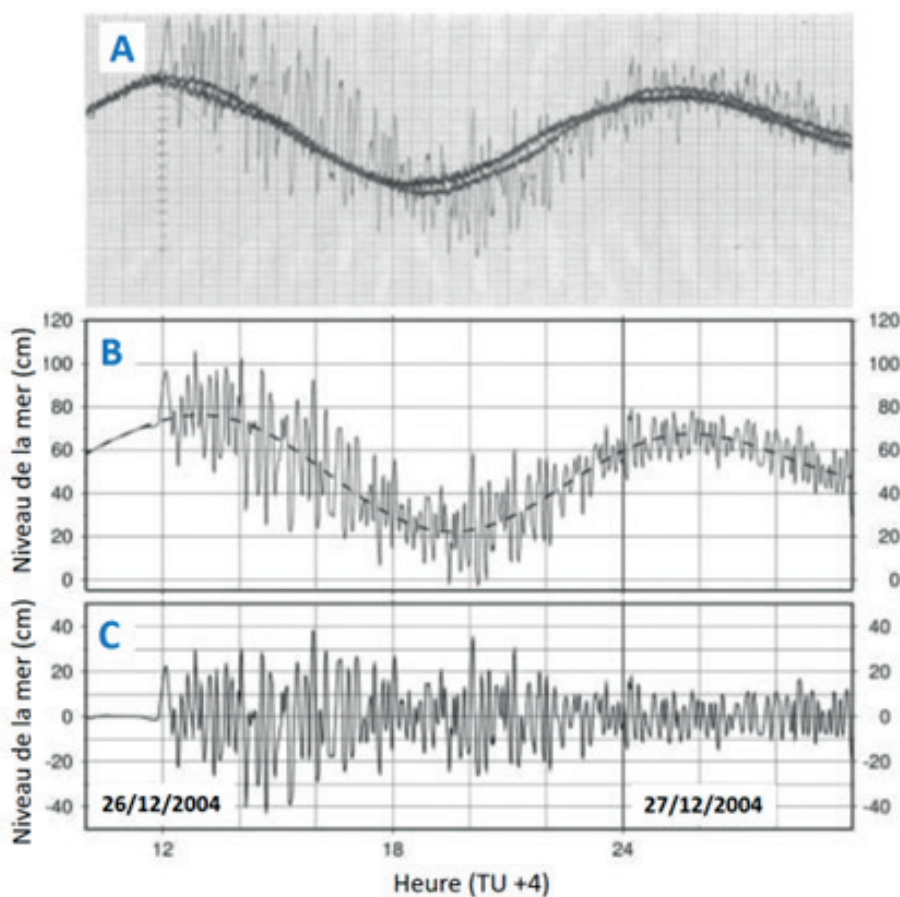


Figure 4. Enregistrement marégraphique original du tsunami de 2004 dans l’océan Indien, dans le port de la Pointe des Galets, avec trois jours de signaux de marée superposés (A), numérisés (B) et finalement filtrés (C) pour extraire le signal tsunami, ici sur une durée de 18 h environ, avec une amplitude maximale proche de 80 cm (adapté de [6]).

À l’époque, très peu de données de marégraphes étaient disponibles hors Pacifique pour étudier les tsunamis, et les observations du tsunami de 2004 reposent parfois davantage sur les témoignages de victimes (photographies, vidéos). À la Pointe des Galets (île de La Réunion), les données du marégraphe analogique OTT R16 ont néanmoins permis de reconstituer les caractéristiques du tsunami (*figure 4*), arrivé environ 7 heures après le séisme, qui a produit des dégâts portuaires importants (rupture d’amarres par exemple), et des hauteurs de vagues de 2 à 3 mètres autour de l’île.

En 2005, la Commission océanographique intergouvernementale de l’UNESCO (COI/Unesco) a établi des Groupes de coordination intergouvernementaux (GIC) dans tous les océans et mers concernés (océan Indien, Caraïbes, Nord-Est Atlantique et Méditerranée) sur le modèle de celui

formalisé depuis 1965 dans le Pacifique [7]. Chaque État membre peut contribuer à cette dynamique, en particulier en mettant à disposition des données pour faire fonctionner les centres d’alerte établis dans ce cadre. À l’aide des réseaux sismiques, les centres d’alerte détectent, localisent et caractérisent les séismes. L’objectif est de définir rapidement si un tsunami a pu être généré, afin d’envoyer dès que possible les messages d’alerte vers les autorités nationales (les sécurités civiles en particulier), et également vers les autres centres d’alerte.

Le déclenchement et la propagation des tsunamis sont suivis pendant plusieurs heures sur les réseaux marégraphiques. Les données mises à disposition dans ce but permettent de valider ou d’infirmar la présence d’un tsunami, et les caractéristiques mesurées sont partagées avec les autorités et les autres centres d’alerte.

Situation en France, pour la Méditerranée occidentale

La France a participé dès 2005 à cette dynamique et a soutenu la création du Centre national d’alerte aux tsunamis (Cenalt), opérationnel depuis 2012, pour surveiller en permanence (24h/24), les côtes métropolitaines exposées de la Méditerranée occidentale et de l’Atlantique nord-est, pour les ministères de l’Intérieur et de la Transition écologique. Dans le cadre de la construction du Cenalt, mais aussi pour la mission de Vigilance vagues-submersion, le Shom a modernisé et densifié le réseau marégraphique RONIM, dont les données sont reçues en temps réel au Cenalt via des liaisons dédiées robustes.

Coordonné et maintenu par le CEA/DAM (Commissariat à l’énergie atomique et aux énergies alternatives, Direction des applications militaires), sur son site de Bruyères-le-Châtel, le Cenalt s’appuie sur les données sismiques et marégraphiques de ses partenaires CNRS/INSU (Institut national des sciences de l’univers) et Shom (Service hydrographique national), pour construire et diffuser les messages d’alerte vers la Sécurité civile.

Le Cenalt analyse en continu les données sismiques et marégraphiques. En quelques minutes, après les premières estimations automatiques, l’opérateur de permanence confirme la détection et les caractéristiques du séisme. Selon les paramètres, il diffuse les messages, envoyés 15 minutes maximum après l’heure du séisme, au Centre opérationnel de gestion interministérielle des crises (Cogic) du ministère de l’Intérieur et, dans le cadre de la COI/UNESCO, aux centres homologues régionaux (Portugal, Italie, Grèce, Turquie) ainsi qu’aux organismes et autorités abonnés. Si un séisme potentiellement tsunamigène est détecté, le Cenalt surveille le niveau de la mer via le réseau de marégraphes du Shom, et des instituts de la région, afin de valider ou d’infirmar la propagation d’un tsunami, en mesurant et transmettant ses caractéristiques (heure d’arrivée, amplitude).

En 2021, suite à un séisme en Algérie (magnitude 5,9), le Cenalt a mesuré sur plusieurs marégraphes (*figure 5*)



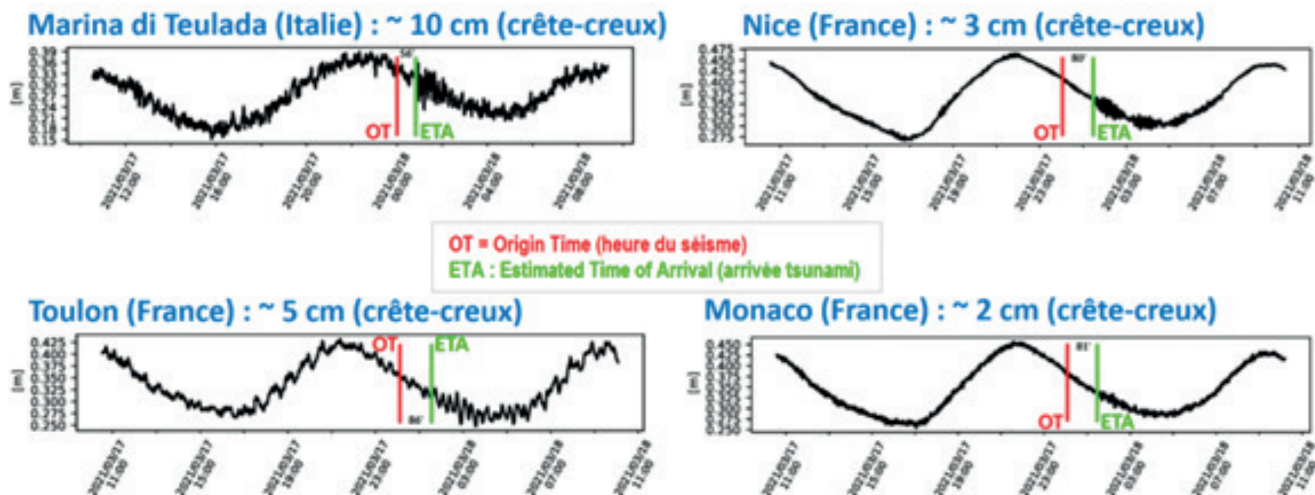


Figure 5. Enregistrements marégraphiques dans quatre ports, suite au séisme du 18 mars 2021 au large de l'Algérie. Les données des marégraphes modernisés, mises à disposition par le Shom pour le Cenalt, permettent de mesurer un tsunami de quelques centimètres dans les ports français.

le passage d'un tsunami de très faible amplitude, en particulier dans trois ports français environ 1 h 40 après le séisme. Les valeurs sont compatibles avec le message diffusé en 9 minutes, de niveau "information" (pas de risque avéré). C'est grâce à la très bonne sensibilité de ces capteurs qu'un tel phénomène a pu être mesuré pour la première fois en France, depuis que le Cenalt surveille en temps réel de tels phénomènes en Méditerranée.

Perspectives d'évolution pour l'alerte aux tsunamis

Le Cenalt étudie aussi les estimations des effets des tsunamis et des hauteurs

de vague à la côte par simulation numérique [8]. Les simulations, encore trop longues par rapport aux délais pour diffuser l'alerte, devraient fournir dans le futur des prévisions des effets côtiers en temps réel, selon les configurations, en s'appuyant sur les marégraphes, et de plus en plus, sur les données de mesure des variations du niveau de la mer, au large, les plus proches des sources tsunamigènes.

Dès les années 1990, de tels moyens de mesure au large ont été développés par les Américains, dans le Pacifique, avec des capteurs de pression au fond des océans, capables de détecter la variation de pression hydrostatique au passage du tsunami [9]. Les mesures

sur ces "tsunamimètres" sont précises dès quelques centimètres d'amplitude et participent de plus en plus aux modèles numériques en temps réel, permettant de mieux prévenir des impacts possibles. C'est ainsi que le Centre polynésien de prévention des tsunamis de Tahiti s'appuie sur de telles données pour produire des modèles dont les résultats sont diffusés dans les messages aux autorités [10].

Cette évolution remarquable devrait s'accroître au fur et à mesure que des réseaux de mesure se développeront au large, grâce à plusieurs nouvelles technologies (voir aussi [11]). En Méditerranée et Atlantique Nord-Est, ces moyens n'existent pas encore. Les

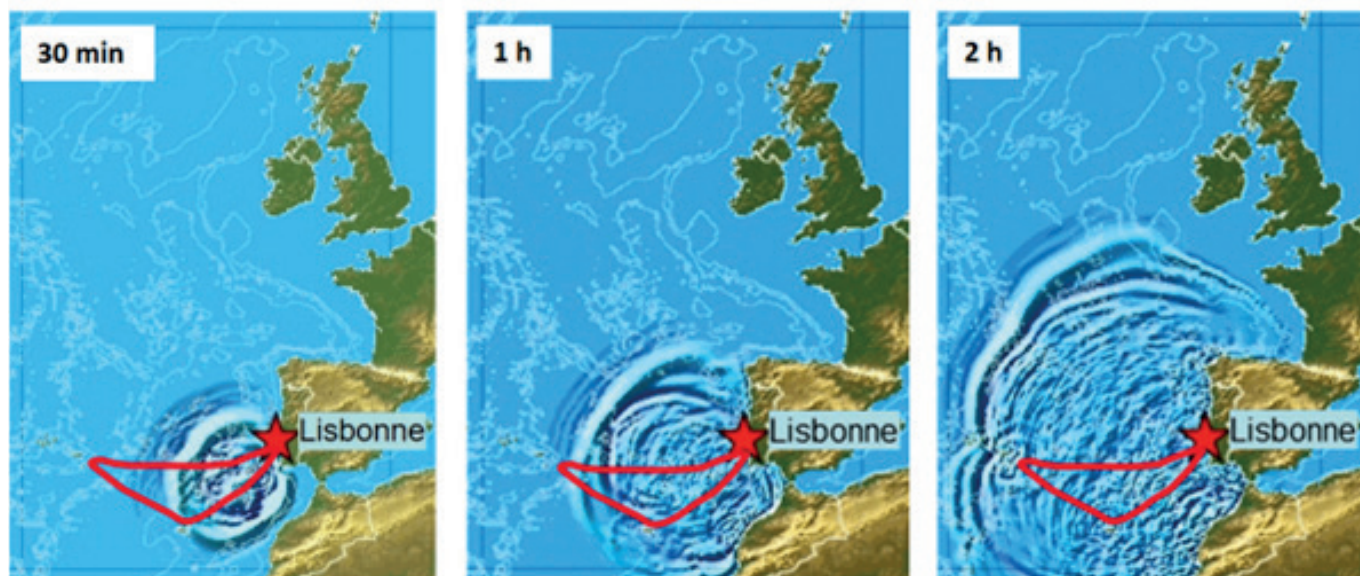


Figure 6. Simulation d'un tsunami similaire au cas de 1755 initié au large de Lisbonne, et positionnement du projet de câble SMART en projet, le long duquel une dizaine de répéteurs devraient être déployés pour relayer des données rapidement après de tels séismes.



projets d'instrumenter les câbles sous-marins de télécommunication, avec des répéteurs dédiés à de l'instrumentation physique et chimique, sont particulièrement prometteurs pour densifier les données au large. Ces câbles, dits SMART (Science Monitoring And Reliable Telecommunications) [12], en projet au large du Portugal [13], permettront, environ 10 à 30 minutes après un fort séisme, d'obtenir les caractéristiques d'un tsunami tel que celui de 1755 déclenché au large de Lisbonne (figure 6).

Le réseau des marégraphes portuaires reste indispensable pour relever les amplitudes portuaires, étudier les phénomènes d'amplification locale, et suivre au cours du temps la propagation le long d'une côte pendant une alerte. Depuis 2005, les réseaux se sont étendus et modernisés (passage en temps réel), de nombreux pays et organismes contribuent aux échanges de données recommandés par la COI/ UNESCO, permettant de rendre plus performants les systèmes d'alerte aux tsunamis. Ces derniers traitent avant tout des tsunamis générés par les séismes. Mais les marégraphes permettent aussi de suivre des événements d'origine météorologique ou volcanique atypique [14], ainsi que des tsunamis déclenchés par des sources gravitaires qui, aujourd'hui, ne font pas l'objet d'une procédure d'alerte liée à un séisme.

Les réseaux marégraphiques côtiers densifiés, robustes, complétés par des mesures au large, pourraient contribuer, à terme, à un réseau global de surveillance et de détection de tout tsunami, quelle que soit son origine, dans une démarche multialéas aujourd'hui préconisée par l'UNESCO.

Remerciements

L'auteur remercie ses collègues du CEA, en particulier des centres d'alerte aux tsunamis, Cenalt (Centre national d'alerte aux tsunamis), et CPPT (Centre polynésien de prévention des tsunamis) pour la Polynésie française, ainsi que ses collègues du Shom, partenaires du Cenalt. La donnée marégraphique de la Pointe des Galets, en 2004, a été mise

à disposition par la Direction départementale de l'équipement de la Réunion qui en était responsable. Les données marégraphiques du réseau français RONIM sont reçues grâce à la collaboration avec le Shom dans le cadre du Cenalt. ●

Contact

Hélène Hébert,
CEA DAM/DIF, 91297 Arpajon,
helene.hebert@cea.fr

Ressources et références

- [1] Hébert, H., F. Schindelé, *Peut-on prévoir les tsunamis ?* Les Petites Pommés, Le Pommier, 2011
- [2] Hébert, H., F. Schindelé, Tsunamis : les connaître pour mieux les prévoir, Encyclopédie de l'Environnement, Université Grenoble Alpes, <https://www.encyclopedie-environnement.org/sol/tsunamis-connaître-prevoir/>
- [3] Sahal, A., et al., *The tsunami triggered by the 21 May 2003 Boumerdes-Zemmouri (Algeria) earthquake: field investigations on the French Mediterranean coast and tsunami modeling*, Natural Hazards and Earth System Sciences, 9, 1823-1834, 2009.
- [4] Alasset, P.J., et al., *The tsunami induced by the 2003 Zemmouri earthquake (Mw=6.9, Algeria): modelling and results*, Geophysical Journal International, 166, 213-226, 2006.
- [5] Roger, J., et al., *The El Asnam October 10th, 1980 inland earthquake: a new hypothesis of tsunami generation*, Geophysical Journal International, 185, 1135-1146, 2011.
- [6] Hébert, H., et al., *Numerical Modeling of the Great 2004 Indian Ocean Tsunami: Focus on the Mascarene Islands*, Bulletin of the Seismological Society of America, 97, S208-S222, 2007.
- [7] *Programme Tsunami de l'Unesco*, <http://www.ioc-tsunami.org/>
- [8] Gailler, A., et al., *Coastal Amplification Laws for the French Tsunami Warning Center: Numerical Modeling and Fast Estimate of Tsunami Wave Heights Along the French Riviera*, Pure and Applied Geophysics 175, 1429-1444, 2018, <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1713-9>
- [9] *Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis (DART) description*, <https://www.ndbc.noaa.gov/dart/dart.shtml>
- [10] Jamelot, A., Reymond, D., *New Tsunami Forecast Tools for the French Polynesia*

- Tsunami Warning System Part II: Numerical Modelling and Tsunami Height Estimation*, Pure Appl. Geophys. 172, 805-819, 2015, <https://doi.org/10.1007/s00024-014-0997-2>
- [11] Hébert, H., et al., *Contributions of Space Missions to Better Tsunami Science: Observations, Models and Warnings, Surveys in Geophysics*, 41, 6, 1535-1581, <https://doi.org/10.1007/s10712-020-09616-2>
- [12] Howe, B.M., et al., 2021, *SMART Subsea Cables for Observing the Earth and Ocean, Mitigating Environmental Hazards, and Supporting the Blue Economy*, Frontiers in Earth Science, <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2021.775544>
- [13] International Telecommunication Unit, <https://www.itu.int/hub/2022/06/submarine-cables-telecom-climate-monitoring-tsunami-forecasts>
- [14] Heinrich, P., et al., *Observations and simulations of the meteotsunami generated by the Tonga eruption on 15 January 2022 in the Mediterranean Sea*, Geophysical Journal International, 234, 903-914, <https://doi.org/10.1093/gji/ggad092>

ABSTRACT

A tsunami is an oceanic wavetrain mostly triggered by submarine earthquakes, volcanic eruptions, landslides. Most of tsunamis are observed in the Pacific Ocean where they are very frequent, and some of them also occur in any other sea or ocean affected by a significant geological activity. The tsunami waves are hardly detected offshore where their amplitudes are low (a few centimeters high), and they become dangerous and possibly catastrophic onshore due to the coastal shoaling effect. Tide gauges are the most convenient sensors to measure such phenomena on the coast, and this article presents a series of various tsunami observations made in different contexts. Finally, it also explores future perspectives concerning offshore tsunami monitoring. Tsunami warning centers are able to detect and monitor such waves, for instance in France, through the French tsunami warning center Cenalt (Centre national d'alerte aux tsunamis), which has been operating since 2012 in CEA, and which alerts national authorities in case of a hazardous tsunami able to impact Mediterranean and NE Atlantic French coastlines, thanks to tide gauge data provided by its partner Shom.