

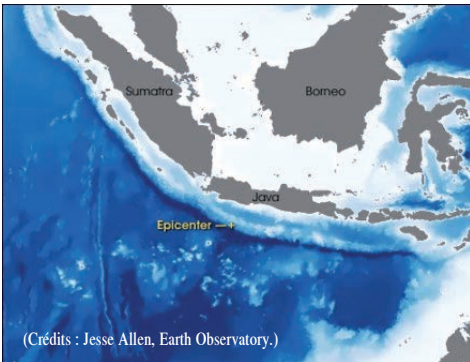
Les tsunamis

Frédéric Dias

Les tsunamis, ces ondes marines qui provoquent de gigantesques murs d'eau dévastateurs, restent encore méconnus. Même si l'on tend vers une modélisation mathématique globale du phénomène, sa prédiction est à ce jour difficilement réalisable.

Les tsunamis, grandes ondes marines que le langage courant désigne par *raz de marée*, sont parmi les phénomènes physiques les plus spectaculaires. Tous les peuples vivant près des mers ont des histoires, des traditions et des légendes qui s'y rapportent. Depuis le début des années 1990, on a constaté un regain de ces phénomènes qui a culminé avec le méga-tsunami du 26 décembre 2004 et qui continue. On en compte en moyenne un par an. Le dernier tsunami meurtrier remonte au 17 juillet 2006. Il frappa Java, tuant plus de 600 personnes.

Trois phases distinctes caractérisent un tsunami : son déclenchement, sa propagation et son déferlement.



(Crédits : Jesse Allen, Earth Observatory.)

Le déclenchement

A l'origine du phénomène, on trouve le plus souvent une dislocation rapide des fonds marins suite à un tremblement de terre, ou parfois un glissement de terrain sous-marin. Une éruption volcanique ou l'effondrement d'une falaise peuvent aussi en être la cause (1). Lors de son déclenchement suite à un tremblement de terre sous-marin, un tsunami a souvent la forme d'un N, de telle sorte que l'arrivée d'un tsunami est parfois précédée par un abaissement du niveau de l'eau, voire une disparition temporaire de l'eau, comme lors du tsunami du 26 décembre 2004 sur les côtes thaïlandaises ou indonésiennes.

La propagation

Parce qu'elle trouve son origine dans un événement brutal, l'onde qui se propage a des caractéristiques très différentes de celles des ondes qui sont générées par le vent puis se regroupent pour former la houle. Et elle n'a a priori rien à voir non plus avec les vagues scélérates (*freak waves* en anglais), ces vagues géantes qui surgissent en pleine mer, même en l'absence de vent, et dont l'origine reste encore mystérieuse (1). Pour fixer les idées, un tsunami peut avoir une période d'une demi-heure et une longueur d'onde dépassant 100 kilomètres, tandis que la houle a une période typique de 15 secondes et une longueur d'onde de 350 mètres. Pour analyser la propagation d'une onde, le rapport entre la profondeur de l'eau et la longueur

d'onde est à l'évidence un paramètre important. Dans l'océan Pacifique, là où la profondeur moyenne est de 4000 mètres, ce paramètre est de l'ordre de 12 pour la houle et de 0,04 pour un tsunami qui, de façon contre intuitive, correspond donc à un modèle d'onde en eau peu profonde. D'un point de vue physique, un tsunami peut être approximativement considéré comme une onde non dispersive : cette appellation provient du fait que sa vitesse (v) ne dépend que de l'accélération due à la gravité ($g = 9,8\text{m/s}^2$) et de la profondeur de l'eau (h).

La formule est simple $v = \sqrt{gh}$; une application numérique fournit une vitesse d'environ 200 m/s, c'est-à-dire plus de 700 km/h !

Le déferlement

C'est la phase de déferlement, c'est-à-dire de repliement de l'onde sur elle-même, suivie de l'inondation, qui intéresse évidemment au premier chef les organismes responsables de donner l'alerte, voire les concepteurs de structures capables d'absorber l'énergie du tsunami. Mais pour les chercheurs, il est indispensable d'étudier l'ensemble du phénomène.

Quels sont les enjeux scientifiques, ou comment décrire les trois phases du phénomène ?

Le rêve du mathématicien serait bien sûr de pouvoir écrire un code de calcul global qui décrive précisément les trois phases à la fois. Pour l'instant, les codes ne sont cependant spécialisés pour

l'une ou l'autre des phases, essentiellement car les échelles sont différentes. La première est la plus difficile à modéliser car les résultats expérimentaux et les données sont très limités. L'objectif est de pouvoir décrire une déformation du fond sous-marin et d'en déduire la déformation initiale de la surface de l'eau (2). Mais comment représenter de façon précise la géométrie du fond et la dynamique de la rupture ou du glissement, qui sont malheureusement souvent inconnues, ainsi que les interactions non-linéaires entre le mouvement du fond et la surface de l'eau ? En particulier, les accélérations verticales, négligées dans les modèles classiques de type onde longue, jouent certainement un rôle important dans le déclenchement du tsunami. En principe, il faut alors passer aux équations complètes de la mécanique des fluides en présence de surface libre, à savoir les équations de Navier-Stokes ou, à la rigueur, les équations d'Euler dans lesquelles les effets de la dissipation visqueuse sont négligés. A l'heure actuelle, quelques programmes sont disponibles pour effectuer cette tâche mais, les paramètres étant trop nombreux et le temps de calcul trop long, ils sont d'une utilité toute relative.

La phase de propagation est celle qui a été la plus étudiée mais elle reste encore difficile à modéliser même si de grands progrès ont été effectués récemment. La grande majorité des codes de calcul repose sur des modèles en eau peu profonde de type Saint-Venant ou Boussinesq. On peut dire grossièrement que dans ces modèles les variations selon la verticale sont négligées : les

Les tsunamis

équations sont intégrées selon la direction verticale, ce qui réduit d'une unité le nombre de dimensions du problème. De fait, comme les tsunamis se propagent sur de grandes distances, il est difficilement envisageable de modéliser la phase de propagation en utilisant les équations de Navier-Stokes. Le coût en heures de calcul serait prohibitif.

Quant à la phase de *déferlement* / *inondation*, certains modèles permettent de prédire jusqu'où et à quelle hauteur le tsunami va se propager à l'intérieur des terres. S'il ne rencontre pas d'obstacle, il peut pénétrer sur plusieurs centaines de mètres, voire plus. Sur la longueur et la hauteur de pénétration, les résultats peuvent facilement varier d'un facteur 5 à 10. Les scientifiques qui travaillent sur les tsunamis s'accordent pour reconnaître que les résultats sont très sensibles à la condition initiale utilisée dans le code de *propagation* / *déferlement*. La phase de modélisation du déclenchement du tsunami est donc cruciale. Or, peu de données sont disponibles même si le méga-tsunami de l'océan Indien a fourni des données inespérées.



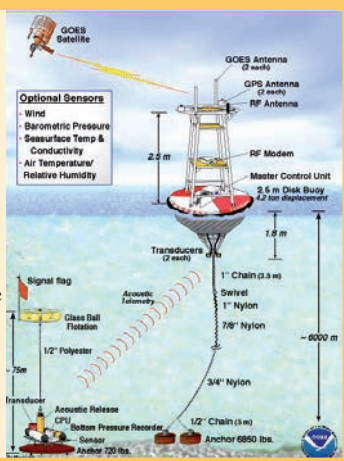
mascaret puissant sur une rivière de Chine - JP Petit

Un des enjeux est celui de l'amélioration des prédictions en temps réel.

Il s'agit de concevoir de meilleures méthodes pour obtenir de façon précise la magnitude du tremblement de terre,

Système de repérage des tsunamis

La mesure de pression dans les fonds marin (BPR) permettant de détecter des tsunamis de 1 cm, est transmise à une bouée de surface en liaison avec un satellite GOES et des stations de surveillance au sol



mettre moins de temps pour déduire des données sismiques des informations sur la source, puis les insérer comme condition initiale dans le code d'hydrodynamique, faire propager la vague jusqu'aux côtes en un quart d'heure de temps de calcul, transmettre de façon plus efficace l'information aux organismes compétents et donner l'alerte à temps.

Les spécialistes en la matière ont donc du travail sur la planche avant que l'on puisse prédire de façon satisfaisante ces phénomènes !

Frédéric Dias

Article publié dans La Recherche HS Mathématiques décembre 2007

Pour en savoir (un peu) plus

La Recherche a publié :

(1) Ph. Heinrich et al.,

" Modéliser un raz de marée créé par un volcan ",
La Recherche, mars 1999.

(1) M. Olagnon, Pour la Science, 280, 14, 2001.

(2) C. Synolakis et al., Science, 278, 598, 1997.

E. Okal, La Recherche, 393, janvier 2006

E. Geist, V. Titov, C. Synolakis, Scientific American,
294(1), janvier 2006, p56-63

Numéro special du European Journal of Mechanics
B/Fluids, September-october 2006, Rogue waves

Sites internet:

<http://nctr.pmel.noaa.gov/>

<http://www.jma.go.jp/en/tsunami/>