



HAL
open science

Modélisation mathématique des tsunamis

Frédéric Dias

► **To cite this version:**

Frédéric Dias. Modélisation mathématique des tsunamis. Images des Mathématiques, 2011, <http://images.math.cnrs.fr/Modelisation-mathematique-des.html>. hal-00599332

HAL Id: hal-00599332

<https://hal.science/hal-00599332v1>

Submitted on 9 Jun 2011

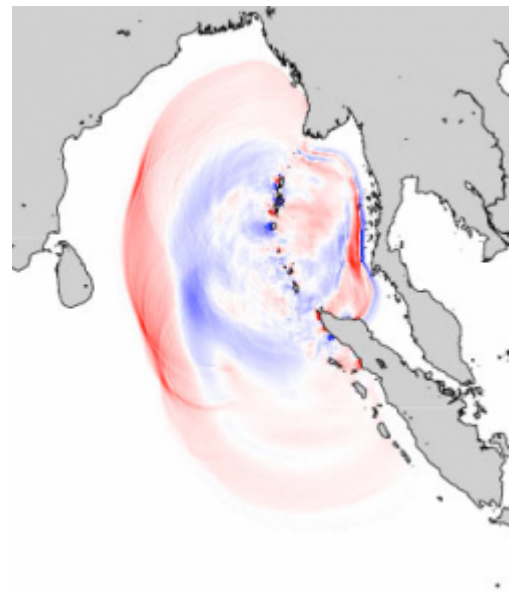
HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Modélisation mathématique des tsunamis

Le 3 mars 2011, par **Frédéric Dias**

Professeur à l'ENS de Cachan, détaché à University
College Dublin ([page web](#))



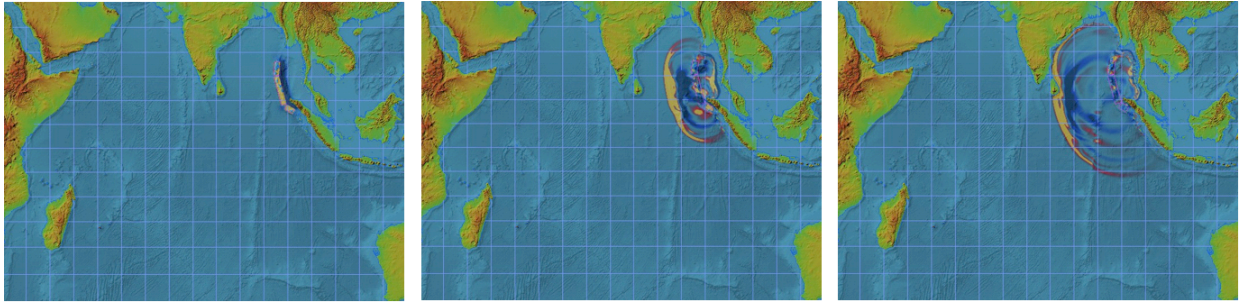
Les tsunamis, ces ondes marines qui provoquent de gigantesques murs d'eau dévastateurs, restent encore méconnus même si des progrès ont été effectués depuis le méga-tsunami du 26 décembre 2004 . Bien que l'on tende vers une modélisation mathématique globale du phénomène, sa prédiction est à ce jour difficilement réalisable. [1]

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 26 octobre 2010. Il frappa les îles Mentawai en Indonésie, tuant plus de 700 personnes.

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

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. Lorsque son déclenchement fait 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.



Calcul de la propagation du tsunami de décembre 2004 (Sumatra)

*Cette simulation a été réalisée par V. Titov et montre la propagation du tsunami dans le golfe du Bengale : l'image de gauche correspond à l'élévation du niveau de la mer au moment du séisme, alors que les deux suivantes présentent celles 1h et 2h après le déclenchement. **Vasily Titov** est un expert en modélisation au Centre de Recherche pour les Tsunamis du **NOAA**.*

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, même si des progrès ont été effectués ces dernières années. 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 considéré comme une onde non dispersive [2] : 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 ! En revanche, un tsunami ralentit considérablement en se rapprochant des côtes.

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.



L'inondation créée par le tsunami en Thaïlande (2004)

Cette *série de photos* a été prise par C. Malatesta le 26 décembre sur les *îles Phi Phi* à l'ouest de la Thaïlande.

Modélisation.

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 les trois phases à la fois. Pour l'instant, les codes ne sont cependant spécialisés que pour l'une ou l'autre des phases, essentiellement car les échelles sont différentes.

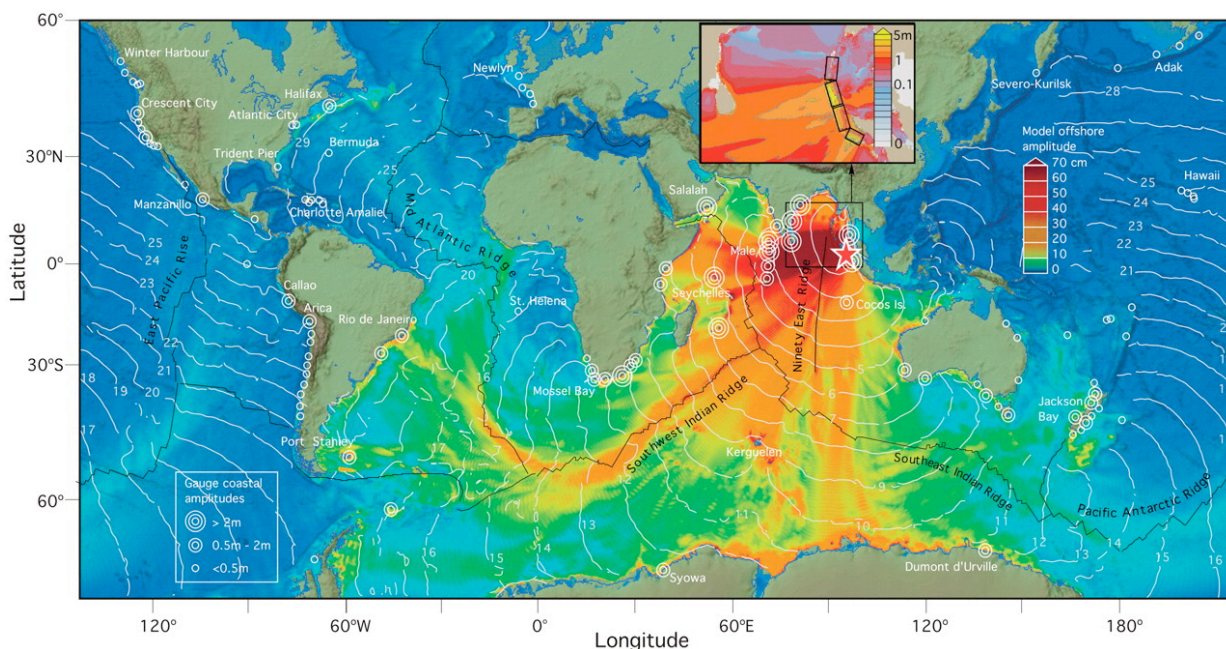
La première est la plus difficile à modéliser car les résultats expérimentaux et les données sont très limités. L'objectif est de pouvoir décrire une déformation du fond sous-marin et d'en déduire la déformation initiale de la surface de l'eau. Mais comment représenter de façon précise la géométrie du 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 [3], 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 [4]. 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. De manière schématique, la grande majorité des codes de calcul négligent les variations selon la verticale. Les équations sont intégrées selon cette direction, ce qui réduit d'une unité le nombre de dimensions du problème. Il en résulte ce que l'on appelle des modèles en eau peu profonde, dont il existe plusieurs types comme par exemple ceux dits de Saint-Venant ou Boussinesq [5]. 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 bathymétrie [6] locale et 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.

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, 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 !



Simulation du tsunami de décembre 2004 (Sumatra)

Les couleurs représentent la hauteur maximale (en haute mer) du tsunami, calculée au cours d'une simulation de propagation de l'onde. Les contours en blanc avec les chiffres représentent les temps d'arrivée du tsunami (soit 29 heures pour la côte est

des USA). Les cercles (« Gauge coastal amplitudes ») indiquent le lieu et l'amplitude (dans 3 catégories) du tsunami à la côte. La miniature montre la géométrie de la faille utilisée dans l'initialisation du modèle et un zoom sur l'amplitude des ondes calculées dans le golfe du Bengale (cf. première image de cet article). Cette image est extraite de l'article de V. Titov et al. (Science, 2005) **suivant**.

P.S. :

La rédaction d'Images des mathématiques, ainsi que l'auteur, remercient les personnes suivantes pour leur aide dans la production de cet article : Thomas Boulier, Arthur Milchior et Paul Vigneaux.

Notes

[▲1] Cet article est une version mise à jour d'un article paru dans La Recherche N° 345, septembre 2001, www.larecherche.fr

[▲2] Nous ne décrivons pas plus avant la notion d'onde dispersive et renvoyons les lecteurs intéressés à la littérature plus spécialisée. Mentionnons toutefois que pour le tsunami de 2004, des mesures expérimentales ont montré que l'onde était légèrement dispersive, ce qui fait que la relation $v = \sqrt{gh}$ approche avec une petite différence la vitesse observée en réalité.

[▲3] Expression utilisée lorsque la longueur d'onde est beaucoup plus grande que la profondeur d'eau. C'est bien le cas pour un tsunami, comme évoqué dans le paragraphe « Propagation », qui utilise d'ailleurs un synonyme de « onde longue » : « onde en milieu peu profond ».

[▲4] On pourra découvrir ces équations dans l'**article** d'Isabelle Gallagher sur ce même site.

[▲5] De même, nous ne rentrerons pas trop dans les détails qui les distinguent. Toutefois, pour se faire une idée qualitative de la différence entre ces deux modèles, nous renvoyons à cette **simulation** numérique disponible sur Wikipédia.

[▲6] La bathymétrie est aux océans (ou lacs, etc), ce que la topographie est à la montagne : la description des variations du terrain, comme on peut le voir sur les cartes IGN, par exemple.

Pour citer cet article : **Frédéric Dias**, « **Modélisation mathématique des tsunamis** » — *Images des Mathématiques*, CNRS, 2011. En ligne, URL : <http://images.math.cnrs.fr/Modelisation-mathematique-des.html>